

一个迷人的故事，着重探讨超越希格斯玻色子发现的新物理，
以及能够引领我们实现这个目标的巨型粒子加速器。

从万里长城到 巨型对撞机

中国探索宇宙最深层奥秘的前景

[美] 丘成桐 史蒂夫·纳迪斯 著
鲜于中之 何红建 译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京•BEIJING

内 容 简 介

对粒子物理标准模型中最后要素长达 48 年的搜寻，终以 2012 年希格斯玻色子的发现而告登峰造极。当人们还在欢庆这一巨大胜利之时，中国科学家已经开始了新的征程，他们将继续人类对自然界基本组元长达几个世纪的探索。具体而言，他们开始为建造一台巨型加速器做基本准备。这台机器周长可达 100 千米，足以将物理学带入一片前所未及的高能领域，在这里将有可能发现大量新粒子及新的重要对称性。

建造这样一台设备势在必行：即使标准模型能以惊人的精度描写基本粒子的行为，也仍然不完整，因为该理论无法解释宇宙大爆炸、万有引力、暗物质、暗能量等影响深远的现象。

本书将向读者介绍，像中国提出的“巨型对撞机”这样一台具有雄心的机器如何能够提供关于宇宙及其基本组元之起源的更加完整透彻的理解。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

从万里长城到巨型对撞机：中国探索宇宙最深层奥秘的前景 / (美) 丘成桐，
(美) 纳迪斯著；鲜于中之，何红建译. —北京：电子工业出版社，2016.4

ISBN 978-7-121-28176-1

I . ①从… II . ①丘… ②纳… ③鲜… ④何… III . ①对撞机 - 普及读物
IV . ① O572.21-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 029884 号

责任编辑：白 涛

印 刷：中国电影出版社印刷厂

装 订：中国电影出版社印刷厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：720×1000 1/16 印张：15.25 字数：200 千字

版 次：2016 年 4 月第 1 版

印 次：2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价：89.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

献给为揭示从宏观到微观尺度自然定律而努力奋斗的物理学家们。

献给全世界为支持这些努力并以自己的方式推动知识进步的人们。

目录

推荐序	VII
中文版序言	XXI
前言	XXIII
前奏	新的万里长城
引言	集结号
第 1 章	击碎原子
	探索原子结构之谜
	探索基本粒子的新武器——加速器
	神奇的反物质
	宇称破坏
	共振态与奇妙的夸克
	从新夸克到胶子与 QCD
	从规范对称性破缺到发现 W 和 Z 粒子
	标准模型的宏伟大厦
第 2 章	追踪希格斯
	希格斯机制与质量起源
	搜寻希格斯的历程
	发现神秘的希格斯粒子

第 3 章	超越标准模型	83
	标准模型的缺憾	83
	超对称	92
	额外维度与复合希格斯粒子	103
	新一代对撞机	106
第 4 章	中国在舞台中央	115
	CMB 观测与宇宙暴胀的遗迹	115
	锦屏地下实验室与暗物质探测	117
	阿尔法磁谱仪的太空使命	119
	大亚湾与 JUNO 中微子实验	122
	新中国高能物理的峥嵘岁月	132
第 5 章	为了全世界、属于全世界的加速器	155
	超越 LHC: CEPC-SPPC 计划	155
	未来对撞机探索新物理	162
	其他对撞机计划	169
	规划 CEPC 与 SPPC 的蓝图	172
第 6 章	最神奇的意外收获	185
后记	长城之下有何物	199
附录	LHC 安全吗?	203
	索引	207

推荐序 1

巨型对撞机

自 2012 年在 CERN 发现希格斯玻色子以来，一批中国科学家就开始努力说服中国政府与公众在中国建造下一代高能对撞机。这批科学家由中国科学院高能物理研究所所长王贻芳领导，并得到菲尔兹奖得主丘成桐的支持。

丘成桐与纳迪斯在本书中详尽阐述了，这些科学家怎样下定决心，他们现有的基础如何，以及他们取得政府支持并在万里长城东端与太平洋海岸毗邻区域实现这一梦想的机会如何。

希格斯玻色子的发现是粒子物理学的转折点。它一方面完成了对标准理论的粒子谱的发现，使之成为迄今为止描述自然现象最为成功的理论。另一方面，它留下了一些有待回答的问题，比如：中微子质量的起源、在引力作用下聚集在星系周围的不发光物质（即“暗物质”），还有希格斯玻色子质量与量子引力尺度（即所谓普朗克质量）之间 17 个数量级的悬殊差异。本书详细阐述了我们缘何确信标准理论只是一个更为完整结构的近似。这一结构将在更高的能量尺度以新粒子与新相互作用的形式展现出来，正如标准模型是法拉第与麦克斯韦的电动力学在更高能量尺度的完备实现。因此，我们需要将 CERN 的机器推向其高能极限，同时开始规划新机器和探索新的能量区域。

迄今所有讨论过的方案都基于一种“原子粉碎机”的现代版，即由奥地利物理学家布鲁诺·陶舍克（Bruno Touschek）于 20 世纪 60 年代在意大利首先研发的“对撞机”。两束粒子在一根高度真空的管道中被加速到很高能量后对头碰撞。这些粒子束可以是正负电子，如同陶舍克最初的设计；也可以是正反质子，这种方案由 CERN 最先设计出来，并被应用于费米实验室的 Tevatron；还可以完全是质子，就像 CERN 的大型强子对撞机那样。根据爱因斯坦的公式 $m=E/c^2$ ，我们给予粒子束的所有能量在对撞过程中都可用来产生新粒子，从而使对撞机比老式的原子粉碎机强大得多。因为后者仅仅将高能粒子束射向固定靶，故而所产生粒子的质量仅仅正比于束流能量的平方根。

这本书展望了建造一条大型环形隧道的设想。这条隧道将安装一台正负电子对撞机，之后再置入一台质子对撞机。至于其他项目，在日本建造一台正负电子直线对撞机（国际直线对撞机，ILC）的计划已经拿上台面。大约在高能所提出方案的同一时期，CERN 也开始研究未来环形对撞机（FCC）的可能性，其隧道将在日内瓦湖下面穿过，并延伸到日内瓦与阿尔卑斯山之间的区域。

巨型对撞机的计划并非无中生有。过去 50 年里，在杰出华人物理学家、诺贝尔奖得主李政道、杨振宁和丁肇中的激励下，中国物理学取得巨大进步。本书对此做了引人入胜的记述。

如今，中国粒子物理的中心位于北京的高能物理研究所。它最初由张文裕创建于 1973 年，目前由王贻芳领导，而且实现了与国际接轨。一支茁壮成长的团队已经形成。过去十年中，在中国开展的粒子物理实验在中微子振荡和强作用介子物理方面做出了世界一流的结果。高能所也参与了大科学装置的建造。其中，高能所前所长陈和生领导了北京正负电子对撞机的升级、散裂中子源以及随后的基于加速器的核裂变等雄心勃勃的项目。

本书有力论证了，中国物理学家与工程师已做好建造大型科学装置的准备，并与欧洲和美国一同参与高能竞赛。高能所创始人张文裕在 20 世纪 70 年代就提议建造一台可与 SLAC 和 CERN 的机器相竞争的 50GeV 质子加速器，而这条道路如今对于中国愈加光明。

高能物理的大事业需要国际合作（不过天文学、宇宙学，以及如今的生物科学都莫不如此），本书很好地阐明了其中的理由。我想在此以我个人的观点作结，它们来自我关于 CERN 大型强子对撞机（LHC）以及相关探测器的工作经验。

我们需要国际合作，至少有两个原因：其一是财政资源，其二是人力资源，或者更一般地说，实践经验。当然，这两者关系密切。对于对撞机的非东道主国家，他们的财政贡献决定了该国有多少科学家与工程师参与到该项目，也决定了在多大程度上可以将其认为是属于他们、让他们投入精力和职业生涯从事研究的项目。

由于此类项目的规模巨大，即使像中国这样的大国也很难独立资助，因此，整合国外资源实际上是必需的。此外，资源共享也有助于降低建造这样一台高级复杂设备的风险，同时也保证了，在建设过程遇到困难时可以得到国际支持（在此进程中肯定会遇到困难）。国际资源也将帮助解决另一个问题，即其他科学领域会感到政府将注意力完全集中于一个项目而产生反对意见。如丘成桐和纳迪斯所言，“水涨船高”，政府对科学的关注从长远来看对所有领域都有好处。不过，科学界内部的反对意见对这一事业可能会是致命的，如同美国取消超导超级对撞机（SSC）那样。

仅从建设、操作该设备与探测器所需的劳动力来看，人力资源的共享不可或缺。因为所需人力显然超过了即使是中国这样一个大国的召集能力，不仅从人数上，更重要地，从该事业所需的人才、技能和创新能力来看，都是如此。

而该事业所需的实践经验和尖端技术则是人力资源共享的另一个方面。这一项目在其所有方面都需要配备最好的技术，单独一个国家无法完全胜任。特别是在巨型对撞机的质子对撞阶段，高场强超导磁铁、质子束流动力学和控制等等技术目前都集中在世界上的两大实验室，即欧洲的 CERN 和美国的费米实验室。如果没有与这两个已有实验室的紧密联系，在一个全新的实验室里重复这些技术将是相当困难的。

丘成桐与纳迪斯描绘了将出现在未来数十年内的情景。中国一旦能够进入高能量前沿的国际竞赛，必将是绝对的、最受欢迎的新鲜事物。

卢查诺·迈安尼

罗马，2015 年 12 月 5 日

卢查诺·迈安尼 (Luciano Maiani)

CERN 理事会总裁 (1997)，CERN 总干事 (1999—2003)，意大利国家研究委员会 CNR 董事长 (2008—至今)，曾获美国物理学会 Sakurai Prize (1987)、意大利国际理论物理中心 Dirac Medal (2007)、欧洲物理学会 EPS Prize (2011)。

推荐序 2

巨型对撞机、粒子物理与 中国科学发展

《从万里长城到巨型对撞机》讲述了一个非凡的故事，那就是人类对微观世界从原子到夸克的好奇心如何同时改变了我们对宇宙以及对我们自身存在的理解。这个故事穿越两千年，从古希腊的原子论者出发，在随后的千年中缓慢推进，而从汤姆逊发现电子到近来发现希格斯玻色子这大约 120 年里，则以惊人的步伐加速前进。

2012 年 7 月 4 日在 CERN 宣布发现希格斯玻色子，是整个科学史乃至人类全部历史中的重大里程碑。它向我们揭示了关于宇宙的非凡事实。我们如今知道，我们的宇宙填充着一种量子场，它对于我们自身的存在以及我们所知的一切存在物都至关重要。若不是它，电子就没有质量，原子就不会形成，因而也就没有恒星，没有地球，没有人类！希格斯玻色子的发现完成了粒子物理学的标准模型，这是人类有史以来对自然界在最基本的层次上最全面的描述。但这并不是故事的终结。的确，在一本激动人心的著作中，最好将这看作其中一章的结束。

希格斯玻色子虽然回答了许多重要而深刻的问题，但是它提出的新问题比它解决的问题还要多。在标准模型之外、在我们所能确切解释的事实之外，还有新的奥秘。我们如今知道，宇宙物质中的绝大多数并非我们熟知的物质，而是一种我们看不见且尚无任何理解的暗物

质。不过我们知道，暗物质能够解释宇宙的大尺度结构，还能解释恒星在星系中令人困惑的运动。这种暗物质也许与超对称有关。超对称是一种非常基本的理论，它提出了一系列新的基本粒子。目前 CERN 正在积极搜寻它们。或者，暗物质也可能全然是另一种东西，很可能大大出乎人们的预料。不过大致可以确定的是，无论它是什么，都与希格斯玻色子有着某种联系，所以这种新粒子很可能就是给这段光辉历史进程打开下一篇章大门的钥匙。

正因如此，中国乃至全世界的粒子物理学家，都对在中国建造巨型对撞机的可能性激动不已。中国巨型对撞机的第一阶段将是环形正负电子对撞机（CEPC），它使正负电子在 240GeV 能量尺度发生对撞。这正是产生在 CERN 发现的那种希格斯玻色子所需的能量。这台对撞机将大量产生希格斯玻色子，从而使我们以空前的精度研究其性质。事实上，物理学家可以通过精确测量寻找对粒子物理标准模型预言的细微偏离，从而提供关于新物理领域的无可争辩的证据，并对今后的实验与理论给予重要指引。当然，实验结果对标准模型没有任何偏差也将是同等重要的事实，因为这将为我们提供宝贵线索，帮助我们排除许多假想的新物理模型。无论如何，这台机器将在一个全新的基本层次上观察自然，也会将中国推向基础科学的最前沿。

在粒子物理学家看来，中国巨型对撞机所能取得的潜在突破非常清楚，并且意义重大。而中国从中所能取得的收益也同样清楚和引人注目。粒子物理学既有许多实在的益处，又有一些巨大而无形的效益。首先，从最基本的层面研究宇宙如何运转的传统历史悠久，对这一领域的贡献将是永恒的。因而这在文化层面上就极端重要。它能带来声誉、承载历史意义并鼓舞人心。我想指出，物理学经常是通过关于我们在宇宙中的位置这样的大问题吸引年轻人，然而一旦他们进入物理学领域，就还会看到像拓扑绝缘体这样美妙的东西，他们从前肯定想象不到会对之发生兴趣，而且这些东西还有巨大的实用价值。粒子物理俘

获想象力，并极大地推动了科学进步，这对所有科学领域都大有裨益。此外，我们还有像万维网这样的意外收获。粒子物理领域还创造了超导线与超导强场磁铁，同时为医学诊断研发了加速器、将辐射探测器应用到了医学影像学中。

《从万里长城到巨型对撞机》一书讲述了粒子物理学如何改变了我们日常生存的精彩故事，尽管在任何时候，粒子物理看上去似乎都与我们的日常生活毫无关系。本书还讲述了粒子物理学怎样为了一个更伟大的目标，而成就了迄今为止全球和平与合作的最佳典范。而这一点将是未来世界所愈加需要的。最后，此书描述了一台位于中国的巨型对撞机的激动人心的可能性，它将成为通往下一个重大突破和进入粒子物理学新篇章的桥梁。

中国是当今世界上最伟大的民族之一，因此，在人类对宇宙最为古老、最为基础、最为深刻的研究进行到最为激动人心的关头，中国完全适合成为其新的领导者。

乔·因坎德拉

2015 年 11 月 23 日于加州圣巴巴拉

乔·因坎德拉 (Joe Incandela)

CMS 实验前发言人，基础物理学突破奖得主，美国科学院院士。

推荐序 3

《从万里长城到巨型对撞机》 读后有感

我读了丘成桐和史蒂夫·纳迪斯的新作《从万里长城到巨型对撞机》之后非常激动，该书讲述了中国提出建造环形正负电子对撞机“希格斯工厂”的计划。我目前正在哈佛大学讲授一门粒子物理课程，与学生们分享了这个巨型希格斯玻色子工厂的提议。他们正在做一项小组作业：以这台巨型对撞机的提议方案为基础，探讨有可能揭示出哪些超越标准模型的新物理。就实验粒子物理的前景与未来而言，这项关于 CEPC / 巨型对撞机的提议对于学生、博士后与教授们都极具吸引力。特别是学生们对于在中国参与物理研究尤感兴奋。我热切希望中国政府继续支持这个精彩项目，它将使中国居于未来国际粒子物理领域的中心。

梅丽莎·富兰克林

2015 年 11 月于麻省剑桥

梅丽莎·富兰克林 (Melissa Franklin)

ATLAS 实验家，哈佛大学物理系马林克罗特讲席教授，哈佛大学前物理系主任。

推荐序 4

粒子物理学发展的绝妙契机

丘成桐教授一直是我敬佩的英雄，他在数学及几何学的成就早获肯定。我多年来就花了不少时间钻研他那被广泛应用于粒子物理学中弦论的“卡拉比-丘空间”的数学结构。至于史蒂夫·纳迪斯（Steve Nadis），我认识他已有十年之久。作为一位专业科普作家，他一直将天文学、物理学及数学中一些艰深的技术概念以轻松手法，言简意赅地于其著作中与普罗大众分享，将前瞻性的科学研究成果普及。

本书的两位作者早年并非出道于物理专业。有趣的是，正因如此，他们比行内的人更能以浅白的写作手法，演说基本物理的历史演化，并从客观角度探讨我国建造巨型粒子对撞机的可能性和重要性；以崭新的角度，为粒子物理（高能物理）研究发展带来冲击与反思。

某次当我在跟朋友分享我们怎样利用粒子对撞机了解物质的基本结构时，她突然问道：“这实验如何能促进经济发展呢？”显然我不会有答案，因为在得出任何研究结果前，我们难以掌握应用范畴。

曾听说过一个传言，讲述在 19 世纪中叶，时任英国财政大臣的威廉·格拉德斯通（Sir William Gladstone）在预备财政预算时，物理学家迈克尔·法拉第（Michael Faraday）向他解释推动电磁学研究的重要性。当时格拉德斯通问法拉第：“发展电磁有什么用处？”法拉第毫不犹豫地回答：“这项研究将会为国家带来大量的税收！”时至今日，我

们的日常生活已经广泛应用电磁学，但科学家最初对电磁学的研究并不是因为他们觊觎着研究成果的实际用途，而是单纯源于人类与生俱来的求知欲和认识世界的渴求。

粒子对撞机是一种崭新的加速器，在过去一个世纪的基础物理研究上扮演着举足轻重的角色。除此以外，加速器亦在医学、生命科学和材料科技等各范畴中大放异彩。作为一个粒子物理学研究者，我认为建造巨型对撞机将是人类文明发展的一个重要里程碑。它将现存各种高科技，包括材料技术、磁铁技术、低温技术及真空技术等，推向极致。不论此机器在世界任何一个角落建造，都必定会引来成千上万全球顶尖科学家，使其跨越肤色、种族、宗教、国籍及文化背景的界限，云集于这旷古烁今的机器前，投身于物理研究中。这种尖端科技带来的提升是我本人乃至国际高能物理界同人所乐于见到的。

在 2012 年，由王贻芳及陆锦标领导，美国、中国、俄罗斯和捷克等世界各地 30 多所大学及国家实验室研究人员参与的大亚湾中微子实验国际合作组宣布发现一种新的中微子振荡模式，并测量到其振荡几率——中微子混合角 θ_{13} 。这是最新的一个物理学基本参数（其他参数包括牛顿的万有引力常数、真空光速、元电荷、电子质量等）。这一发现更被美国权威杂志《科学》评选为年度十大科学突破之一。此外，更获得 2016 年度基础物理学突破奖。由此可见，中国在国际大型科研合作舞台上已经具备扮演领导角色的能力。

倘若最终我国能承担起建造这台巨型粒子对撞机的历史使命，这不仅表明中国对发展科研当仁不让的决心，更能引进世界顶尖科研人才汇聚长城之都，极大推进我国尚未领先世界的高能物理学发展，振兴高科技与产业，为国家科研发展打下良好基础，并为国内许多摩拳擦掌的青年科研人员打一支强心针，修直年轻学人探究科学之路。

本著作《从万里长城到巨型对撞机》先以英语起稿，邀请高能物理界国际专家们参与商榷和提供建议，取得国际上公认后才翻译成中

文发行，这反映出丘成桐先生推动国家科研发展的认真和执着。他多年来锲而不舍地推动国家数学及科学发展的精神令我极其欣赏。盼望本书为当今物理学界带来一番讨论之余，让普罗大众对粒子物理有更深认识，刺激更多科研之星投身相关研究之中，把国家乃至世界的粒子物理研究推向一个新高峰。

戴自海

2015 年于香港

戴自海 (S.-H. Henry Tye)

香港科技大学赛马会高等研究院院长，康奈尔大学讲座教授。

中文版序言

我首先得感谢何红建教授和鲜于中之博士，他们花了很多功夫，用美妙的文字在很短的时间翻译了我和 Steve Nadis 这部关于高能物理和探索在中国建立大型粒子加速器可能性的著作。

在这本书英文版刚完成，而译本即将完成的时候，我们听到了好几件令人振奋的事情：第一件是屠呦呦获得诺贝尔奖，第二件是王贻芳领导的团队在大亚湾研究中微子的实验成果得到国际物理学界的肯定，和美日科学家共享国际有名的突破大奖。这些都是中国科学家在中国本土做出的世界第一流的成果，实实在在地证明了中国科学家的能力！中华儿女多奇志，我希望我们在这个基础上，更进一步，在科学最前沿的高能物理的研究和实验上，与全球科学家合作，更进一步揭示出构造宇宙大自然的奥秘！这不单是中国两百年来学者所期待的，也是全球科学家的愿望，希望我们通过浅易的文笔，能够向中国普罗大众阐明这项科学工作的重要性。

——丘成桐，2015 年 11 月于麻省剑桥

前言

行走于数学 – 物理之间

许多人认为我是纯数学家，他们大概会感到吃惊的是我在积极推动中国建造一台大装置。同事们和我有时称这台大装置为“巨型对撞机”，这原本是诺贝尔物理学奖得主戴维·格罗斯（David Gross）建议的名字。这台考虑中的设备可能成为人类有史以来最强大的粒子加速器，不过也要取决于世界各地类似计划的进展。这项任务的关键绝不在于建造足以夸耀为“世界最大”的机器，而是要修建一台能够开辟基础物理学新领域的设备，以揭示我们目前仍无法企及的宇宙奥秘。

我对这项事业发生兴趣的原因很多，其中不少都会在本书中详细阐述。我的合著者与我本人的首要动机是想弄明白，是否有充分的理由来实施如此庞大而极具挑战的项目。与该领域的许多同事们一样，我们确认这种规模的机器对于基础物理学的进步极为关键。或许更重要的是，它将满足人类理解周遭世界的永恒渴望。

代之以总结这些理由，我想在此谈几点个人的动机。首先应当指出，虽然我的多数研究工作或许要归属“数学”名下，但我在物理学期刊上也发表过很多文章。我还同时在哈佛大学数学系和物理系任职。这种交叠其实出自个人爱好：我喜欢在这两个充满活力的领域的交界线上工作。我觉得身居此地令人激动。不过除此以外，我还意识到，由观察和理解自然界所启发得到的物理观念，能够大大激发数学的发展。

当然这种影响是相互的。在很多层面上数学对于物理学至关重要。我不只是在说物理定律本质上就是数学公式这个事实。数学进展时常强烈地影响着物理学，有时甚至会在自然界中具体地呈现出来。这两种学问的交缠如此紧密，以至于通常很难说（而且这样说也没有多少意义）数学在哪里终止、物理学从何处接管。

或许讲一段故事可以解释得更清楚。1970 年，我来到美国伯克利念数学研究生。从那时开始我就对爱因斯坦的广义相对论很着迷，只是以前尚未深入学习过。我当时的专业与今天一样，是几何学。而爱因斯坦提供了某种新东西：引力的几何表述。与其将引力描写成两个重物间的吸引力，他说，不如将引力设想成重物的存在导致了时空曲率。爱因斯坦提到的时空扭曲与所谓的“里奇曲率”有关。这使我想到：如果时空处于真空状态，其中空无一物，那会怎样呢？在没有质量的情况下是否还可能有（诸如里奇曲率之类的）曲率呢？

让我惊喜的是，我很快发现几何学家尤吉尼奥·卡拉比（Eugenio Calabi）在 20 多年前就已提出了几乎完全一样的问题，只不过用相当抽象的数学语言表达成了一种面目全非的形式。这就是卡拉比猜想。不过卡拉比在 1953 年提出这一猜想时却坚持说“这与物理毫无关系”，至少在他看来，“这完全是几何”。

卡拉比猜想要求存在一种偶数维的几何对象，或者说“空间”，它有很多特性，尤其具有一种奇怪的对称性。很多几何学家认为这种东西“过于美好”，他们认为满足卡拉比所提条件的空间在数学上是不可能的。虽然我最初对此也颇有怀疑，但经过对卡拉比猜想的多年研究，我终于在 1976 年证明了它实际上是对的。这类由卡拉比引入而我最终证明其存在性的空间于是被称为卡拉比-丘空间或卡拉比-丘流形。我强烈地感到我的工作物理中会很重，而且不仅限于我最初起步的广义相对论问题。但这一重要性将在何处出现，以及怎样出现，我还不完全清楚。

大致在同一时期，从 20 世纪 70 年代初起，物理学家则开始猜测自然界具有一种所谓“超对称”的假想对称性。如果这是真的，就有可能解决关于量子场论的很多困惑，而量子场论又是粒子物理的主导性理论（当时是，至今仍是）。没人证明我们的世界究竟是否有超对称，不过卡拉比 - 丘空间具有这种对称性就至少说明它自有数学合理性。至于它的一些物理效应，本书将在随后探讨。

故事尚未就此结束。1984 年，物理学家来找我了。他们在寻找含有超对称的高维空间，这在弦论中具有核心作用。他们觉得卡拉比 - 丘空间或许就是答案。弦论正试图做一些之前的物理理论从未成功过的事情，它想解释并统一自然界中所有作用力和所有粒子。至于要弄明白弦论是否正确地描述了宇宙，还有很长的路要走，而且看来没有实验能在近期解决这个问题。不过即使如此，弦论已在多个前沿激发了重要的数学工作。例如，物理学家偶然发现了不同的卡拉比 - 丘空间之间有一种前所未有的密切联系——“镜像对称性”。它复兴了枚举几何学领域，同时导致对许多难题的解答，其中有些难题甚至可追溯到 19 世纪。我和我的同事尝试探索这个概念的根源，从而为镜像对称性确立牢固的数学基础。

从上面这个例子可以看出，有一股稳流往返于物理和数学之间，对这两个领域既有益又重要。我已屡次发现，物理直觉对数学家极有助益。我也知道数学工作帮助物理学研究的很多例子。除了对物理学出于私心的支持外，我同时也真正喜欢这门学问。我是物理学及一切前沿科学的一大倡导者。

然而若不是真实实验的定期输入，基础物理学给予数学的灵感之流也无法永远持续下去。坦率地说，若没有得到经验确证，物理学家就无法确定他们的想法是否正确。我仍然清晰地记得 1990 年访问 CERN 的情景。在那里人们向我介绍了地面下大约 100 米处周长 27 千米的环形隧道，大型强子对撞机（LHC）最终将在此加速粒子。对这种取精用

宏的工程设计，我印象十分深刻。几十年后，LHC 兑现了它的伟大承诺，以希格斯玻色子的发现为粒子物理的所谓“标准模型”画上了句号。希格斯玻色子有时还被称作“上帝粒子”。（然而科学家几乎从不这么叫，他们觉得这更像宣传策略，与科学并无关系。）

现在是时候考虑下一代更大更好的机器了。这回，隧道也许长达 100 千米，以便将粒子加速得更快，从而使对撞能量提升到从前的 5~10 倍。这台设备可将我们带向超越标准模型的全新境界，还有可能在此过程中发现一系列新粒子。将这样一台机器称为“巨型对撞机”一点都不言过其实。我承认这个名字有些宏伟，但是这种项目的确当得起如此赞誉。

我生于中国。过去，我也花了很大精力帮助促进这里的科学与数学研究，这其中包括在大陆（内地、香港）和台湾建立了 6 个数学研究所。因此，我很乐意见到这台巨大的粒子加速器在祖国的土地上诞生，尽管它的建设与运行在各个方面都需要国际合作。虽然这台机器的基地或许在中国，但它意在对每个人开放使用。

于是我决定更加主动地投身于其中，而不只是坐观其成。为此，我与中国、美国和欧洲的物理学家，以及中国政府的高级官员会面，讨论这项事业的潜在收益。我经常强调的一点是，这个项目具有提升国内外所有科学水平的潜在能力——绝不仅限于物理相关的领域，这就像谚语所说的“水涨船高”。虽然一位极端重量级的中国领导人没有即刻完全同意这项提议，但其答复也并不消极。在当前阶段这已然可谓成功，该计划也因此保持了生机。对于同我一样的积极倡导者，这样的答复既带来了做成这件事的希望，也为接下来的行动争取到了时间。

我还就此主题在北京主持了一场由一些世界顶尖物理学家参与的论坛，与会各方都对我们的计划给予了密切关注。随后，我帮助将关于此对撞机的一封信递交给了另一位中国政府最高级别的领导人。这

一任务并不像听上去那样容易，因为我需要事先与中央组织部部长、科技部部长和中国科学技术协会主席商榷。其中每一环节都很关键，因为这些主管官员都可能对该项目造成重要的阻力。然而他们都同意这个想法值得考虑，这使得个别有影响的人物当初对该对撞机的批评意见也随之烟消云散了。

就我个人而言，我愿看到中国提升自己在科学领域的世界声望。坦率地说，中国的声望的确需要提升。尽管政府近年来显著加大了科技方面的投入，中国学者发表的论文也相应增多，但是以引用数等标准衡量，这些论文及其背后的研究工作，就质量与原创性而论，仍然落后于美国与其他主要西方国家。平心而论，在粒子物理及其他科学领域中，中国需要追赶，需要为此做很多工作。在某些领域，我们甚至还有数十年的差距。

尽管如此，除去我的乡土情结，我还认为此类加速器探索项目是超越国界的，它能够启迪人们，并且对我们星球上的每个人都很重要。我在这里提到的机器不只是说中国的对撞机，而是一台为全世界而建的对撞机，它事关世界各个角落的物理学家。

这项计划还将深入一项更宏大的事业，关乎“文明”一词的全部含义。简言之，为了确保人类自身的活力与存在的意义，人类社会需要从地理、科学、艺术等各方面进行探索。我也相信，如果一个目标确实值得追求，那么历史永远会青睐为这个目标而行动的人，而不是它的反对者。那些反对者只会盯着一个项目的价码和缺点，他们总是在寻找不要行动的理由，却从不试图推进。

这本书讨论的实验一旦在高能物理研究的新圣地开展起来，势必会突破目前知识的疆界，从而深化我们对宇宙深层机制的理解。于我而言，在这一系列过程中获得的知识足以列入人类最伟大的成就中。坦率地说，我想不出还有什么比此更高的追求。

2014年8月的首度访华也是我第一次亚洲之行。此前我曾遍游美国各地，而那是一个只有几百年故事的国家。相比之下，中国的文化与历史则可上溯几千年。所以我经常将中国与“旧世界”这个说法联系起来。然而在访问过程中，我发现了一个在某些方面比我年轻的祖国更为现代化的国家：高铁、磁悬浮列车、前沿的遗传学与基因学研究。多少具有讽刺意味的是，我还发现，生活在所谓“旧世界”的人们正在为规划高能物理的新世界与未来而大步前进，而这一领域将会直接或间接地驱动所有其他科学领域的进步。我很失望地讲，我的祖国根本没有在认真考虑这类雄心勃勃的计划。

在中国，我见到了大开眼界的绝妙风景，尝到了品种繁多的陌生食物，还受到人们热情而友善的款待。在旅行中，从北京到香港的途中各处（还有不在途中的各处），我遇到了许多为我的研究提供热情帮助的人。我要感谢他们，连同美国和欧洲等世界各地朋友的帮助。没有他们就不可能有这本书。下列各位对本书的写作提供了协助。如果这里遗漏了任何人的贡献，我提前向他们致歉。

姜·巴特沃思 Jon Butterworth

陈丕燊 Pisin Chen

周为仁 Weiren Chou

朱明中 Ming-Chung Chu

罗伯特·戴格拉夫 Robbert Dijkgraaf

约翰·艾利斯 John Ellis

高杰 Jie Gao

布莱恩·格林恩 Brian Greene

郭立军 Lijun Guo

弗莱德·哈里斯 Fred Harris

何红建 Hong-Jian He

何倩 Rebecca He

任娟 Ren Juan

郭兆林 Chao-Lin Kuo

肯·赖 (音) Ken Lai

李小男 Xiaonan Li

娄辛丑 Xinchou Lou

迈克尔·罗伊 Michael Loy

吕才典 Cai-Dian Lu

汪璐 Wang Lu

陆锦标 Kam-Biu Luk

卢察诺·迈安尼 Luciano Maiani

森井政宏 Masahiro Morii

秦庆 Qing Qin

克里斯托弗·罗根 Christopher Rogan

马修·施瓦茨 Matthew Schwartz

内森·塞伯格 Nathan Seiberg

邵书珩 Shu-Heng Shao

沈肖雁 Xiaoyan Shen

萧文礼 Gary Shiu

马特·斯特拉斯勒 Matt Strassler

安迪·斯特劳明格 Andy Strominger

杰拉德·埃图夫特 Gerard 't Hooft

屠艳珺 Yanjun Tu

艾伦·沃克 Alan Walker

爱德华·威滕 Edward Witten

于程辉 Chenghui Yu

张闯 Chuang Zhang

我想特别感谢几位提供了巨大帮助的人士：尼玛·阿卡尼-哈梅德（Nima Arkani-Hamed）、戴维·格罗斯、约瑟夫·因坎德拉（Joe Incandela）、阿舒托什·考特瓦尔（Ashutosh Kotwal）、迈克尔·佩斯金（Michael Peskin）、戴自海（Henry Tye）、王贻芳。他们为这项工作慷慨地贡献时间与学识，仅仅是因为他们关注高能物理的未来，并期盼这个领域能够前进和茁壮成长。

何红建与鲜于中之应得到特别的赞扬，他们接过了翻译的任务，将我们时常曲折繁复的文字翻译成完美的中文。高能物理研究所的王晨芳非常棒地搜集到了中国物理学家与研究设备的图片。国际出版社（International Press）的布莱恩·毕安基尼（Brian Bianchini）将我们单调的 Word 文档奇妙地转化成了一本漂亮的书，艾琳·迈克埃尔罗伊（Aileen McElroy）负责公众宣传，秦立新监督整个出版项目。此外，我们为黄夕夕绝妙的封面设计而高兴。我们也感谢林颖璇编写了本书的索引。

在此过程中，毛林·阿姆斯特朗（Maureen Armstrong）、陈丽苹（Lily Chan）与艾琳·迈恩德（Irene Minder）提供了非常宝贵的行政支持。盖里·毛尔蒙（Gary Malmon）热情地带我参观北京（有时候我觉得骑在他的摩托车上真是危险极了！）。我还要感谢我的家人：梅丽莎（Melissa）、朱丽叶（Juliet）和波琳（Pauline），还有我的父母——罗琳（Lorraine）和马蒂（Marty），在我为本书工作期间，他们一直在鼓励我。

我的合著者丘成桐感谢他的夫人郭友云与儿子明诚（Isaac）、正熙（Michael）的支持。

——史蒂夫·纳迪斯（Steve Nadis），2015 年于麻省剑桥

新的万里长城

中国长城，是为抵御蒙古及其他北方侵略者而修建的防御工事。其名既副其实，实亦足当其名。长城是人类有史以来所建造的最长建筑，也是最具雄心的建筑工程项目之一。它可为地球观测卫星所见，被誉为“世界七大奇迹”之一。这段长达 6000 多千米的城墙大多修建于明代（1368—1644）。现存的长城中，既有新近修葺的片段，也有严重销蚀的残垣。若将修建于 2000 多年前而如今仅有遗迹的部分一并计入，那么根据近来的测量，该建筑全长超过 21000 千米。^[1]

长城由岩石和砖块辅以砂浆、泥土建成。其所名之为“城”者，更精确的描述毋宁说是一条城墙网络，它时而重叠、时而间断，同时有烽火台排布其间。其主城墙连同各个分支，东迄东海，西至位于西北的甘肃省嘉峪关，途中重峦叠嶂，让人屏息凝神的景色吸引了无数游客。仅仅是位于北京以北约 70 千米的八达岭长城，每年就要接待 450 万游客。^[2] 其他部分同样壮美如画，但相对偏远，深居荒凉的不毛之地，远离城市与人群。

古人认为，长城最初由统一中国的第一位皇帝——秦始皇（约公元前 260—前 210 年）兴建，但其中部分城墙可追溯到公元前 7 世纪。这座建筑最初以“万里长城”知名。^[3] 在字面上这相当于 5000 千米（1 里等于 500 米），但从比喻义理解之，则意谓无穷无尽。当然，秦皇的大业对他自己而言很难说是无穷无尽的。尽管他渴望长生，但还是在

长城开建大约十年之后去世，时年 50 岁。当时，中国大约五分之一的人口参与了长城的建设，^[4]而该城墙很大程度上实现了其最初的目标，在随后的数百年中有效地抵御了北方的侵略者。

2200 多年之后的今天，地缘政治环境已经大为不同。中国不再需要抵御侵略者的环状防御工事。多少世纪以来难以逾越的屏障如今已成为名胜景观，成为世界顶级旅游胜地之一，吸引人们前来驻足凝望与沉思。今天，人们正在考虑一个规模几乎与长城相当的项目，一座新时代的长城。它将使用最新的先进技术，把科学推向未知的崭新前沿，并将增进人类文明。该项目在观念上与那座震铄千古的宏伟建筑一脉相承，只不过它将被用于科学探索而非军事目的。

具体而言，该项目计划修建有史以来最大的机器，一台“巨型对撞机”。为了破解宇宙之谜，它要将极为微小的粒子加速到接近光速，并使之沿一条位于地下 100 米深处、周长可达 100 千米的环形轨道运行。这样一台设备身价不菲，在其建设与运行期间或许要花费中国 GDP 的大约万分之一。但是，这台对撞机将会从各方面对社会给予巨大回报，并将像万里长城那样激发出巨大的民族自豪感。“它有望做出的科学发现、对科技进步的贡献，以及对整个中国的贡献，都会被永久铭记”，诺贝尔物理奖得主戴维·格罗斯说。作为加州大学圣芭芭拉分校的教授，他曾数度来到中国，与物理学家和政府领导商谈该计划。^[5]

麻省理工学院（MIT）的物理学家弗兰克·韦尔切克（Frank Wilczek）对此观点表示赞同。他与格罗斯合作完成了最终使他们获得诺贝尔奖的工作。尽管不是特别就中国的计划而言，但韦尔切克曾将运行过的一台大型粒子加速器称为一座高耸的“好奇心之纪念碑”。^[6]

而这的确是新近提出的对撞机的首要目标：满足人类对知识永无止境的追求，并为那些自人类产生理性思想之初便思考的问题提供线索。简言之，这个项目的目标是，揭示自然在其最基本层次上的

运作方式。在该层次上，周遭世界的所有物体都被还原成为基本粒子，以及支配其相互作用的力。

如此规模的实验项目所需的技术很可能会刺激中国的长期发展，同时带动新的实验室周边居民区与商业区的发展。来自世界各地的大约 10000 名科学家与工程师，再加上相当数量的建筑工人，将热切盼望来到这里参与这一最前沿的科学事业。就此而言，相对于长城的功能，至少是其最初的设计目标，这台新对撞机的作用几乎与之背道而驰。“长城意在阻挡外国人，而巨型对撞机则会带来外国人”，香港科技大学高等研究院院长戴自海指出。^[7]具有讽刺意味的是，鼓励外国人来到中国，反而会使国家更安全，这再次与当初建造长城的前提相悖。这是通过国际合作伙伴关系与友谊，以及沟通交流的精神而实现的。

对国外学者而言，在某些方面该项目的吸引力来自其在物理学本身的深度与广度。毫不夸张地说，物理学是最为基础的科学，有时甚至被称为“一切的科学”。这是因为，所有其他领域，无论是生物学、化学，还是地质学、海洋学、气象学，在其根源上都由物理定律所控制。如果这台新的科学设备得以实现，它将能保证中国在今后几十年内成为世界高能物理研究的中心。这台设备还将有助于维持，甚至挽救为我们理解宇宙做出如此重要贡献的高能物理领域。

（或许并非）巧合的是，这台巨型加速器的首选地址就在北京以东约 300 千米的港口城市与度假胜地秦皇岛附近。这里常被看作是“万里长城的起点”。在此地，一段被修建成龙头状的明代长城径直伸向太平洋，极尽其延伸之所能，正如一段碑文所说，“与大海握手”。

正如戴维·格罗斯所见，这座计划坐落在长城东端的物理中心一旦建成并成功运行，将会标志着一个全新的开始，其意义或许与建造长城同样重大。它将开启一场智力探险，不仅能帮助人类把握其在穹宇之内的位置，而且将帮助人类揭示宇宙本身的构成。实现这些目标，将需要一台性能空前的机器，一台真正的巨型对撞机。



从万里长城在北京北部的一段俯瞰黄花城水库（照片由 Ken Lai 提供）

参考文献

- [1] Debra Bruno. “Getting the Great Wall to Talk.” *Wall Street Journal*. July 12, 2012.
- [2] Jim Yardley. “Saving the Great Wall From Being Loved to Death.” *New York Times*, November 26, 2006.
- [3] UNESCO. “The Great Wall.” World Heritage List, <http://whc.unesco.org/en/list/438>.
- [4] “The Great Wall of China.” *National Geographic* (online). <http://video.nationalgeographic.com/video/exploreorg/china-great-wall-eorg>.
- [5] “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” (Symposium). Tsinghua University, Beijing, February 23, 2014.
- [6] Frank Wilczek. “‘National greatness’ versus real national greatness.” *Science News*. October 11, 2008, p. 32.
- [7] Henry Tye, Hong Kong University of Science and Technology (e-mail correspondence with the author), April 4, 2015.

引言

集结号

王贻芳现任中国科学院高能物理研究所（以下简称高能所）所长，该研究所拥有 1400 多名成员，年度预算逾两亿美元。作为一位研究事业蒸蒸日上的物理学家，王贻芳胸中颇有丘壑。他需要处理和应对许多问题，但其中有一件事头等重要：这所研究机构全力倾注的高能物理，其未来何在？作为科学家与管理者，王贻芳正努力工作，确保高能物理的前途。

仅就中国而言，国内最主要的粒子加速器是坐落于高能所院内的北京正负电子对撞机 BEPC-II。到 21 世纪 20 年代前期至中期，该对撞机将到达其研究使命的终点。王贻芳获得过 2014 年 W. K. H. 潘诺夫斯基实验物理奖及其他各种奖项。2015 年 11 月，他领导的大亚湾中微子合作组又斩获顶级国际大奖：基础物理学突破奖¹。他需要确保中国物理学家在今后至少有一台高性能的机器以继续其事业。不过，他的眼光绝不局限于国内。目前国际上同类机器之首，当属瑞士日内瓦的大型强子对撞机（LHC）。但它也不会永远运行下去。一旦它在数十年后结束任务，那么除非某处出现一台更大更好的新机器，整个领域就会陷于停滞。

1 参见 <https://breakthroughprize.org/News/29>。——译者注

目前尚未敲定明确的计划。为了获得一台将我们带向物理学前沿阵地的未来加速器，其正式运行前的计划、建设、调试和故障排除就需数十年之功。换言之，眼下就需要有人来为下一代高能物理机器做准备，这将是一条几十年的征途。王贻芳相信中国可以担当这一角色。过去几年里，他已经着手动员与组织国内外的物理学家，并与政府各部门的领导及商界精英商议，试图将这个振奋人心的构想变成现实。

考虑到中国业已为现代物理学做出了不可磨灭的贡献，这并非天方夜谭。李政道和杨振宁由于其对弱作用中“宇称破坏”这种不对称性的突破性洞察而获得 1957 年的诺贝尔物理学奖。这里提到的弱作用是自然界的一种基本作用力，参与放射性、核聚变和其他相关过程。丁肇中也是一位华裔科学家，因发现了一种新的基本粒子 J/ψ 而分享了 1976 年的诺贝尔物理学奖。这些先驱们的工作将在第 1 章和第 4 章详述，他们的贡献为当今一代中国物理学者奠定了基础，这使人联想起艾萨克·牛顿（Isaac Newton）的名言，“站在巨人的肩膀上”。^[1] 虽然李政道、杨振宁和丁肇中对于粒子物理发展及国内物理学事业的成长做出了巨大贡献，但其原创性工作基本上都是在海外完成的。包括王贻芳在内的很多中国物理学家都希望有朝一日能在祖国开展该领域内的重大研究工作，使研究者不必出国就能从事前沿研究。

远在地球另一面，普林斯顿高等研究院的尼玛·阿卡尼 - 哈梅德（Nima Arkani-Hamed）也正在心中酝酿类似的想法。2012 年基础物理学奖得主阿卡尼 - 哈梅德被公认为这一代理论家中的佼佼者。其同行——约翰霍普金斯大学的理论家戴维·卡普兰（David Kaplan）称他为“我们全都仰望的人”。^[2] 阿卡尼 - 哈梅德对全球物理学的处境越发感到不安，对于他过去 20 多年所生活的美国尤其如此。“我们整个领域如今仍在遭受 SSC 创伤的后遗症”，他说。这里提到的 SSC 是指原位于德克萨斯州的超导超级对撞机。1993 年美国国会终止并取消了该项目，此前它曾被看成是全世界最大、能量最高的粒子加速器。

恰好在同年，阿卡尼－哈梅德进入了伯克利的研究生院。他说，自此以后，“美国粒子物理学界走上了下坡路。”^[3]他补充道，我们的视野在本该继续扩展之时却收缩了。与 1993 年时相比，美国国会如今更加失调和目光短浅，对于基础物理学研究完全缺乏鉴赏力。“我们需要找到扭转这个局面的出路”，阿卡尼－哈梅德呼吁，“否则，我们这一代人将会中断开普勒（Kepler）、伽利略（Galileo）、牛顿、爱因斯坦（Einstein）和狄拉克（Dirac）一路开创的事业。我们这一代人有可能把这一切搞砸，这使我夜不能寐。”^[4]

美国的形象正在褪色，欧洲经济也至多只能说表现平平，况且他们还在忙于 LHC。阿卡尼－哈梅德独自思忖，谁将取得建造下一代大型加速器的主导权。几年前，他的脑海中浮现出一个挥之不去的想法：“中国应当建造它。”只要有会，只要有人听，他便到处提出这个想法：“中国怎么样？中国怎么样？”不过这些讨论一直停留在半夜闲谈的程度。直到 2013 年夏天，阿卡尼－哈梅德听到从中国那边传来了几乎相同的声音。

他于 2013 年 8 月亲自来到高能所。在那里，他花了很长时间与王贻芳及其同事讨论。这些见闻使阿卡尼－哈梅德深受触动。“这里已经有人意识到了这会有多困难”，他说，“但是他们仍然愿意卷起袖子大干一场。”他来到中国，本想弄清这究竟是不是一个单纯的幻想，但现在他确信，这项行动确有机会成功。于是，他欣然受聘成为全新的“未来高能物理中心”主任。该中心以高能所为基地，于 2013 年 12 月正式成立。但从那一年 8 月王贻芳、阿卡尼－哈梅德及其他物理学家的交谈中就非正式地开始了。自此以后，越来越多的物理学家开始为了一个共同的目标聚集在一起：这项进程有望最终促成建造一台全新的巨型粒子加速器，它将超越 LHC 与夭折的 SSC。如果说 LHC 是伟大胜利的标志，那么 SSC 则是失败的见证，如今它仅剩深埋于德克萨斯泥土中半途而废的隧道。

这些研究者中，多数人希望利用国内外一切最好的技术在中国建造下一台大机器。但他们也确认，无论建在何处，最紧要的问题是首先要建造这样一台机器，以使该领域保持生机，从而继续人类在最基本的层次上长期探求真理的奋斗。

世界各地的顶级科学家为了这一梦想，于2014年2月23日汇聚北京。他们来到清华大学参加一个由丘成桐先生（本书作者之一）亲自主持的论坛。参加这个论坛的科学家包括王贻芳和阿卡尼-哈梅德，还有约瑟夫·因坎德拉（Joseph Incandela）、戴维·格罗斯、杰拉德·埃图夫特（Gerard 't Hooft）²、卢察诺·迈安尼（Luciano Maiani）、村山齐（Hitoshi Murayama）和爱德华·威滕（Edward Witten）这些曾荣获诺贝尔奖、基础物理学奖、狄拉克奖、菲尔兹奖等著名奖项的杰出学者。这些科学家来到北京共同展望了高能物理的前景，同时论证了建造带领我们走向未来的下一代机器——“巨型对撞机”的科学依据。

当这项计划被介绍给中国公众时，阿卡尼-哈梅德说，清华大学礼堂人声鼎沸。“数以百计的学生们遍布会场的每个角落，他们的热情令人震惊。这里有如此众多的聪明学子，如果能将他们吸收进来真是棒极了。”^[5]

诺贝尔物理学奖得主戴维·格罗斯告诉听众，“这是一个绝好的机会，可以使中国加速前进，并牵头引领对物理学最基本问题的探索。这是一场意义伟大的科学探险，我们中一些人已经赶来给予帮助和支持。”

格罗斯同时强调，这项事业的确至关重要，因为这是推动整个领域前进的唯一方式。“我们一直觉得大自然比我们更聪明。所以，为

2 关于't Hooft，常见的汉译名是“特霍夫特”。但't实际发音为et，因而译作“埃图夫特”更为妥当。——译者注

了弄清它如何运转，我们就需要直接的线索”，他说，“而最简单的办法当然就是观察、寻找、实验，这就是我们打算做的事。”^[6]

声望卓著的理论家爱德华·威滕在很多方面都有杰出贡献，特别是为弦论和M理论做出了重要的奠基性工作。他认为该计划切实可行：“长远看来，若无实验提供新的启发与灵感，理论物理的发展就会变得缓慢”，他说，“过去几十年里，我们有幸目睹了许多伟大的惊人发现，比如宇宙的加速膨胀。今后，为了继续提供理论家所需的灵感，我们仍然要不断开辟新的实验前沿。”^[7]

CERN 是运行 LHC 的著名实验室，曾担任 CERN 总干事的卢察诺·迈安尼对挤满了礼堂的学生们说，他希望高能所“探索未来的周密计划能够实现。就像建造了 Tevatron（美国费米实验室的粒子加速器）的美国与建造了 LHC 的欧洲，我希望中国也能以这种方式参与进来，共同探索微观世界的美丽与简单。”迈安尼补充说，CERN 是一个极为成功的案例：“对于政府而言这是一次成功的投资，它在公众形象、技术及对青年人的培训等方面都带来了巨大回报。”^[8]他认为，中国同样会得到这些收益，或许还有其他即将看到的收益。

加州大学伯克利分校的物理学家、日本数理连携宇宙研究所主任村山齐就后一主题继续展开。面对一群生气勃发踌躇满志的青年学生，村山说，在一个国家主持一个大项目，最重要的事情或许就是激发众人的兴趣。“这对一个国家的未来至关重要。如果年轻人对基础科学、数学和工程没有激情，那么这个国家就没有出路。这种激情确实可以改变一个国家，甚至改变世界。”^[9]

开展这样的项目有充分而合理的理由，这也包括物理学中许多难题需要解决。不过在阿卡尼-哈梅德看来，参与这样的事业最为强烈的理由则是探险精神。^[10]当然，他意识到了这并不全是乐趣。“正如肯尼迪就登月所评论的那样：我们选择做这些事情，不是因为它们容易，

而是因为它们艰难。”我们似乎已将这种精神遗忘，他盼望我们能尽快重新找回它。

这些杰出学者在清华的对话成功地激发了众人对新对撞机的兴趣，以及对相关深入探索的兴趣。本次活动之前，这些想法主要在粒子物理学家的圈子中引发关注。然而在热烈的媒体报道之后，这次对话已经吸引了一般公众和政府官员的注意。

几个月后，参与该论坛的学者连同另外几位诺贝尔物理学奖得主共同撰写了一封联名信。在将这项提议传递给几位党内关键领导后，该联名信的第一签署人丘成桐将此信递交给了一位中国政府的高级官员。在信中，丘成桐与联署者阐明了这台新加速器背后的想法，并论述道，“中国所处的位置完全适合主持该项目，做这一国际行动的领头人。”他们还阐明，“全世界成千上万最有才能的物理学家与工程师将聚集到中国，满腔热情地参与到这项事业中。”这些科学家补充道，通过建造该对撞机，“中国将一跃成为 21 世纪基础物理学的国际领导者。”

这使该项目的支持者们为之一振。不过他们同样清楚，大家尽可以兴奋地畅想各种可能性，但这个初级阶段还只是最容易的部分。从开始的计算、规划、推敲，到最终完成这一重大事业，真正困难的工作尚未开始。大量的这类准备工作将在未来高能物理中心开展，因而这里在今后若干年将成为忙碌的场所。下一步就是要撰写一份关于该机器实验目标的详细报告，提前预算这台新对撞机所能实现的测量范围。

物理学家的日程表上还有很多其他事项：需要进行地质勘探，以确定该机器环形隧道的最佳选址（其周长可达 100 千米）；需要开发更加强大的磁铁以弯曲并引导粒子束；还需要建造精度空前的探测器，开发强化的数据处理、存储与传输的新技术。在进入设计阶段之前，确定有待研发的关键技术难题也是头等大事。



2014年2月，众位声明卓著的科学家齐聚北京，共商有望开辟物理学新领域的巨型粒子对撞机。该论坛的参与者包括（图中自左至右）丘成桐、村山齐、约瑟夫·因坎德拉、爱德华·威滕、戴维·格罗斯、杰拉德·埃图夫特、尼玛·阿卡尼-哈梅德、卢查诺·迈安尼、王贻芳（照片由高能所提供）

另一项关键任务是确认这台对撞机将要涉及的主要物理问题，以判定它能回答哪些至今尚未解开的宇宙之谜。无论理论家事先能提出多少问题，他们都很清楚，一台对撞能量大大提升的新机器也免不了会产生很多出乎意料的结果。这正是他们所期望的——发现令人惊讶、令人震惊的新结果。因为说到底，这样的科学发现将最终导致人类认知宇宙奥秘的伟大飞跃。

不过在继续探讨物理学的未来，以及这台新对撞机将会发现什么之前，对该领域的辉煌历史做一回顾将是富有教益的。希望通过这一回顾，读者能够明白我们如何走到今天，从而能更好地理解，在这一探索未知领地的伟大征途中，我们将去往何处。

参考文献

- [1] “On the Shoulders of Giants” (online). <http://isaacnewton.org.uk/essays/Giants>.
- [2] “Particle Fever” (documentary). Directed by Mark Levinson, 2013.
- [3] Interview. Nima Arkani-Hamed. IHEP. August 8, 2014.
- [4] Nima Arkani-Hamed. Large Hadron Collider Physics Conference. Columbia University. June 6, 2014.
- [5] Ibid.
- [6] David Gross. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [7] Edward Witten. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [8] Luciano Maiani. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [9] Hitoshi Murayama. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [10] Nima Arkani-Hamed. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.

第 1 章

击碎原子

探索原子结构之谜¹

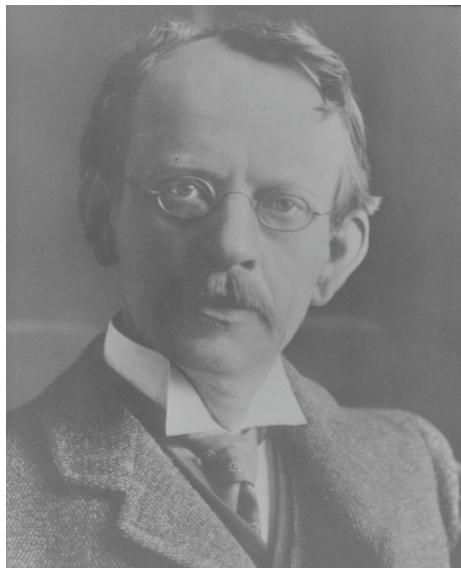
中国倡议建造的巨型对撞机，将有助于进一步加速我们对自然界基本构成的探索。然而这种努力，至少可上溯到公元前 5 世纪。在那遥远的年代，古希腊东北部阿布德拉（Abdera）的海滨小镇中，哲学家留基波（Leucippus）和他的学生德谟克利特（Democritus）提出了“原子论”学说，大约在同一时期这种假说也在印度生根。原子论主张，我们触手可见的一切——也就是“物质”——由一种叫作原子的看不见的基本单元构成。原子组合出了像行星那样庞大而复杂的结构，恰如寻常的砖块筑起奢华的宫殿、0 和 1 拼缀成精妙的计算机程序、简单的字母书写出不朽的文学经典。

物质由微小而定型的基元构成，有如乐高积木——留基波与德谟克利特所提出的这一基本想法大体正确，虽然它在两千多年中一直停留在哲学与形而上学的层面。由于缺乏技术手段与分析方法，古希腊人无法证实原子论，甚至根本就没有试图去证实。19 世纪初，约翰·道尔顿（John Dalton）等化学家的实验结果，对原子论解释给予了经验支持。而直到 19 世纪末 20 世纪初，物理学家才开始掌握相关的技术，以

¹ 节标题为译者所加，便于读者阅读查找，余同。——编者注

明白无误地证实原子论假说。与此同时，物理学家还发现，与原先的猜测不同，原子仍非物质的最小单元，尚可继续分割。

1897年，英国物理学家J.J. 汤姆森（J.J. Thomson）在剑桥大学卡文迪许实验室所进行的实验带来了突破性发现。其时，汤姆森正在研究阴极射线管这种新技术所产生的神秘射线。阴极射线管是长条形的玻璃真空仓，在其两端的电极施加电压可使之放电。汤姆森断定，由这种装置产生的射线，实际上是一束粒子，他称之为“体粒”（corpuscle）²——也就是我们如今所知的电子。通过测量其电荷与质量之比，他确定这些“体粒”其实是原子的成分，能够从原子中剥离出来。这挑战了原子不可改变不可破坏的古老信念，汤姆森也由此开启了对于“亚原子”粒子领域的探索。科学家们后来发现，亚原子粒子中的一部分可被归类为“基本”粒子，因为它们看起来并不由更小、更简单的基元构成。就目前所知，电子正是这样一种基本粒子。



J.J. 汤姆逊的肖像
（照片由宾夕法尼亚州费城
化学遗产基金会提供）

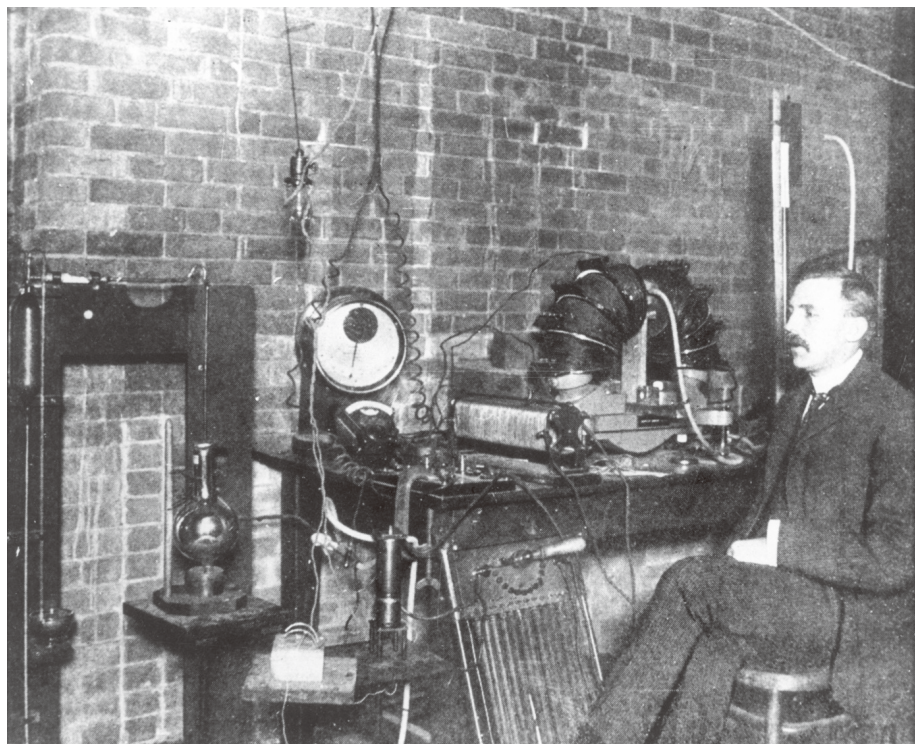
2 “Corpuscle”一词最为所知的义项是“血球”，牛顿曾用其命名他所假想的光粒子。为与这些义项相区别，此处姑借用拉丁语词根“corpus”的含义（体、身体）将其译作体粒。——译者注

几年后，关于原子本身存在的确凿证据出现了。1905年，阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein）发表了一篇关于布朗运动的论文。布朗运动是指悬浮于水面上的灰尘微粒貌似随机的运动，在此之前约80年时由罗伯特·布朗（Robert Brown）通过显微镜最早观察到。爱因斯坦的论文对此做出了解释：布朗运动是水分子随机撞击灰尘微粒的结果。他的分析和数学论证，为物质由原子和分子构成的这一古老猜测提供了很强的佐证。法国物理学家让·佩兰（Jean Perrin）在其实验中记录了悬浮于液体上的微粒的运动图样，其结果与爱因斯坦的理论计算恰好吻合。佩兰还相当精确地估出了这些分子的大小，从而以科学的方式令人满意地证明了原子和分子的存在。佩兰也因此获得了1926年的诺贝尔奖。

既然古希腊人所猜想的原子确有其物，于是新西兰出生的英国物理学家欧内斯特·卢瑟福（Ernest Rutherford）决定去研究原子的性质及其内部结构。关于其内部结构，当时流行的看法出自卢瑟福的博士后导师汤姆森，人称“葡萄干布丁模型”。据此模型，原子是能被穿透的糊状的球，其中，带负电的电子散布于带正电的物质球中，恰如葡萄干嵌在布丁里。卢瑟福及其同事决定对这个模型进行检验，于是从1909年起开始在曼彻斯特大学做实验。

在该实验中，研究者用放射源氦-222样品发射一束 α 粒子（即去除两个电子后的氦原子），然后将这束粒子引向一片很薄的金箔。 α 粒子击中放置在金箔后的屏幕时会发出闪光。如果原子（此处即金原子）如同布丁一样可穿透，那么 α 粒子就应当毫无阻碍地穿过金箔并击中屏幕。然而实验显示，部分粒子被金箔以大角度弹开，甚至还有原路弹回的。“这简直不可思议，就像你用15英寸炮弹对准一张纸巾发射，结果炮弹却被纸巾弹回来砸中你一样，”卢瑟福评论道^[1]。他就此断定，原子的正电荷及其绝大部分质量，都紧密地聚集在我们称为原子核的中心区域，而不是如此前所设想的那样均匀分布。在新的理解中，原

子核被一大群疏松分布的电子所包围。相比较而言，原子核的大小仅相当于原子的几万分之一，然而却聚集了原子 99.9% 以上的质量。^[2]



恩斯特·卢瑟福在麦吉尔大学的实验室工作，约 1907 年。（照片由 W. H. Hayles（麦吉尔大学档案，PR0017771）提供）

由于这些直捣物质核心的深刻发现，卢瑟福坚信，与植物学和动物学等其他领域相比，物理学才是最基本的学科。“一切科学，若非物理，便是集邮。”他的这条断言在物理学家之外想来和者甚寡。^[3]

不过，卢瑟福对基础物理的贡献不止于此。他仍在不断提出新的科学洞见，同时推动新技术的发展，以继续探索原子核的内部结构。在 1919 年赴任剑桥大学卡文迪许实验室主任前夕，卢瑟福用 α 粒子轰击氮原子核，撞出了一种他认为是氢原子核的带正电的粒子。在随后一系列实验中，他用 α 粒子轰击其他元素，如氧和铝，也同样有氢原子出射。于是卢瑟福猜测，氢原子核必定是所有原子核的基本组分，因而在这一层次可被看作基本粒子。他称其为质子。

1920年，卢瑟福预测，原子核必定包含电中性的粒子，即中子，因为只包含带正电质子的原子核将会不稳定。他鼓励卡文迪许实验室的研究人员去寻找中子。与此同时，他开始推动制造人工产生粒子的装置，以便能够产生比天然放射源数量更多且能量更高的粒子。1927年，卢瑟福向英国皇家学会表示，这种装置在物理实验中用途广泛，包括他所鼓励的寻找中子的实验。“我一直渴望得到这样一种实验装置，它能够大量供应原子和电子，而且其能量比放射源产生的 α 粒子和 β 粒子要高得多，”他在皇家学会的一次演讲中说道（卢瑟福在1925—1930年任皇家学会主席），“我的愿望应当能够实现，但是很明显，在实验室中实现这一装置还需要克服很多技术上的困难。”^[4]

实际上，没有等很久，卢瑟福的两个梦想就得以成真，至少是部分如此。1932年，卡文迪许实验室的物理学家詹姆斯·查德威克（James Chadwick）宣布发现了中子。由此可见，原子绝非不可分割，而是包含有“核子”（质子与中子）与电子，甚至包含更小组分，而要看见并分离出它们还需假以时日。

探索基本粒子的新武器——加速器

同年，在卢瑟福实验室工作的约翰·考克罗夫特（John Cockcroft）与欧内斯特·沃尔顿（Ernest Walton）成功将锂原子核碎裂，产生了两个 α 粒子。考克罗夫特与沃尔顿的实验方法或许比结果本身更为重要：他们用800kV的电势差加速质子，使之穿过8英尺³长的真空管，并将锂样品作为靶子置于真空管的末端。他们不仅“首次碎裂原子”，而且建造和使用了世界上最早的粒子加速器之一。^[5]这种装置就像“显微镜”，物理学家即将用其揭示物质在更小尺度的结构。

大约同一时期，在大洋彼岸加州大学伯克利分校的欧内斯特·劳伦斯（Ernest Lawrence）正在制造一种全新的粒子加速器，这种加速器后

3 1英尺=12英寸=0.3048米。——编者注

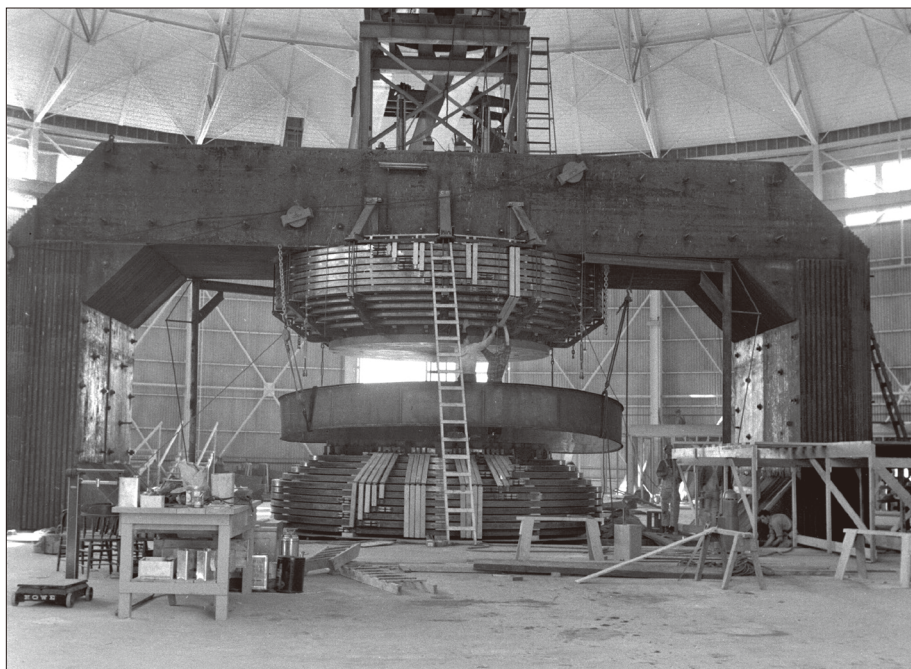
来对这一领域产生了巨大影响。劳伦斯受到挪威工程师罗尔夫·威德罗（Rolf Widerøe）的一篇论文的启发，发明了一种新颖的环形加速器，他称之为“质子的旋转木马”，后来以回旋加速器之名为人所知。第一台回旋加速器建造于1931年，使用了玻璃、石蜡和青铜，还有若干日用品混在其中，其直径不过5英寸左右。它利用磁场使带电粒子沿环形路线行进；当粒子一次次穿过这段加速区域时，电场就对其加速。这种装置成功地将质子的能量提升至8万电子伏（eV）。（1电子伏是一个电子穿过1V的电势所获得或损失的能量。）在同年晚些时候，劳伦斯的助手们主导建造了直径11英寸的回旋加速器，将质子的能量提升到了100万电子伏以上。5年后，劳伦斯实验室所建造的一台回旋加速器可将 α 粒子加速到1600万电子伏。^[6]



恩斯特·劳伦斯，伯克利实验室的创始人，因“发明和发展回旋加速器”而获得了1939年的诺贝尔物理学奖。（照片由伯克利实验室提供）

加速器物理的新纪元就此开始。从那以后，加速器变得愈加庞大、愈加强劲，其中很多当时世界上最大的设备都是劳伦斯回旋加速器的直系后裔。对于这种尺寸不断扩大的机器，物理学家爱德华·威滕解释道：

“许多自然界的奥秘，只有当亚原子粒子以极高的能量对撞，才能被揭示出来。”^[7]



伯克利实验室的 184 英寸回旋加速器，约 1942 年。（照片由伯克利实验室提供）

通过这种方式，研究者已能在瞬间复现据信是宇宙大爆炸之后那一刻的物理条件。他们认为，宇宙在大爆炸之时创造了基本粒子。那时的宇宙极端炽热，事实上只有最基本的粒子才可能存在。这正是粒子物理如此令人着迷的一个原因：它为我们提供了认识宇宙最初时刻的途径，而且这无疑是为迄今为止的最佳途径之一。

达到更高的能量，可以让物理学家在更小的距离尺度探索自然界。这一事实源自量子力学的金科玉律——海森堡（Heisenberg）不确定性原理。此原理说，如果你试图探测如粒子般微小的物体，那么你测量其位置的不确定度，将与该物体的动量成反比。换言之，动量越大，对距离的测量就越精确。因而，在小距离尺度上精确地研究自然，就

需要很高的能量和很大的动量。这恰是加速器的专长，也是建造它们的根本原因。

诺贝尔奖得主斯蒂芬·温伯格（Steven Weinberg）指出，物理学家所期望的是，当加速器达到新的能量水平时，会出现全新的现象。“这种预期几乎总是应验，”他说。^[8]

正如温伯格所言，20 世纪是物理学大丰收的时代，其间有大约 200 多种新粒子被发现、测量和命名。威滕说，这些新发现中的绝大多数是在“高能物理或粒子物理”领域取得的。但是物理学家并不仅仅关注这些粒子本身。威滕谈到：“我们实际上在试图理解最基本的自然定律。”^[9]换言之，对于自然界从微小到巨大尺度上纷繁多样的物质结构，物理学家希望找出其最小的结构单元。与此同时，物理学家还希望理解自然界的基本作用力，它们作用于这些结构单元，使之结合、分离，等等。

从 20 世纪初至今，粒子加速器在这一进程中起到了核心作用。加速器证实了理论预言的众多新粒子，取得了巨大的成功。同时，加速器也带来了许多意外，也许这才是最大的收获——发现出乎意料的东西。

大部分现代加速器仍然沿袭了劳伦斯原先的设计。和早期机器相似，现代加速器操纵带电粒子：用磁场使带电粒子沿正确的方向运动（形象地说，就是“驾驶粒子束流”），同时根据需要用电场尽可能地提高粒子的运行速度。接着，加速器让粒子撞向固定的靶子，或者其他粒子。（其中，后者涉及粒子间的对撞，所以需要更精确的瞄准。但在实际应用中，对撞能够产生更高的能量，因而被广为接受。）环绕在撞击点周围的探测器分拣出撞击的残骸，记录撞击事件的结果。

加速器大体有两种不同的结构（虽然两者常被结合使用）：其一即“同步加速器”，这种结构将粒子限制在环形轨道上，粒子在“跑道”

上一边转圈一边被加速，此即劳伦斯早先设计的回旋加速器的后代；另一种结构将粒子送入直线轨道，粒子在轨道的一端发射，在运行途中加速，飞向轨道的另一端。无论何种结构，目标都是将对撞或撞向固定靶的粒子击碎——这种实验方式在概念上十分简单，然而通常都需要用到当时最尖端的技术。

这类实验的目的，不仅限于弄清粒子的构成——就像把一只钟表砸到墙上去弄清楚它的构成那样。真正的目标通常更为宏大：产生前所未见的新东西。当携带很大动能的两个粒子彼此撞击时，它们能相互结合，创造出一个更重的粒子（它几乎总是不稳定的）。根据爱因斯坦的著名公式 $E=mc^2$ ，初始粒子的质量及其动能，可以被转化成新粒子的质量。在此过程中，物理定律要求能量守恒，但允许质量不守恒。因为爱因斯坦的公式说，质量不过是能量的另一种形式，因而动能可以转化为质量，反之亦然。只要各种能量相加之后与初始的总能量相同，则能量取何种形式都无关紧要。

研究者们渴望不断提高撞击能量，因为这将使其有机会研究前所未见的新粒子——撞击能量愈高，所能撞出的粒子愈重。不过，为了捉住这些新粒子，我们得快些，因为它们可不是日常世界的常客。它们的寿命一般很短，逗留的时间远小于一微秒，而且跑得非常快。“这类实验就像买彩票，”牛津的物理学家弗兰克·克劳斯（Frank Close）说，“大多数撞击只会产生熟知的粒子，但是偶尔运气好，会出现出乎预料的东西。”^[10]

当然，新粒子不会大张旗鼓地到来。恰恰相反，为了发现它们，物理学家必须小心筛查对撞残骸留下的蛛丝马迹，犹如侦探勘察犯罪现场。实际上，物理学家也许永远看不到新粒子本身，而只能观察到它的效应——它所留下的残骸。研究者利用多种探测器来完成这项任务，这些探测器可以记录粒子及其衰变产物所留下的轨迹，并以此确定其速度、质量与电荷。物理学家从一次对撞事件（通常情况下是从

大量对撞事件)取出尽可能多的信息之后,分析人员借助强大的计算机,从这台粒子反应的戏剧中辨认出每个“演员”的身份,期望能捕捉到一两个新奇的“嫌犯”。很多情况下,新粒子无法被直接“看到”,但其存在仍可被甄别出来。这样的分析来自多层叠加的证据,因而足以排除合理的质疑。

神奇的反物质

以这种方式,一代代研究者沿着汤姆森与卢瑟福的足迹继续前行。如前所述,汤姆森发现了电子,而卢瑟福发现了质子,并指导了中子的发现。到了20世纪30年代初,一个重要的物理问题则是,质子和中子是否有相应的“反物质”,即反质子和反中子。这里所谓的反质子,应当与寻常的质子具有相同的质量,但携带相反的电荷(即应当带负电)及相反的磁矩。由于中子不带电,所以反中子与中子质量相同而磁矩相反。

对反物质的猜测,源于英国物理学家保尔·狄拉克(Paul Dirac)于1928年提出的理论。狄拉克将爱因斯坦的狭义相对论与量子物理相融合,以描述快速运动的粒子(亦称“相对论性粒子”)。狄拉克的方程预言了一种新粒子,它与电子质量相同,带电量也相同,但电性相反。换言之,他的理论宣称应当有一种带正电的电子,也就是“反电子”——当时许多物理学家认为这种概念荒诞不经。

然而1932年,加州理工大学的卡尔·安德森(Carl Anderson)恰恰在宇宙射线撞击地球大气层所产生的粒子浴中找到了这种带正电的电子。安德森的实验装置是一种“云室”,即充满过饱和蒸汽并施以强磁场的容器。当带电的宇宙射线粒子进入云室后,在磁场作用下沿曲线运动,其弯曲程度取决于粒子的质量。安德森所辨认到的粒子径迹,与电子径迹的曲率相同但弯曲方向相反。这意味着,该粒子与电子质

量相同，带电量也相同，但电性相反。他将其命名为正电子⁴，该名称一直沿用至今。这是人类首次探测到反物质，虽然安德森当时还不知晓狄拉克的预测。^[11] 安德森因此项工作获得了1936年的诺贝尔物理学奖。同年，他又发现了另一种新粒子—— μ 子。物理学家此前并没有预料到 μ 子的存在，因而并不清楚它在粒子世界中扮演何种角色。（这一出乎意料的发现引出了哥伦比亚大学的诺贝尔奖得主伊西多·拉比（Isidor Rabi）的一个有名的妙问：“谁订购了它？”^[12]）与电子相同， μ 子带一个单位的负电荷，但这个新粒子比电子重207倍。

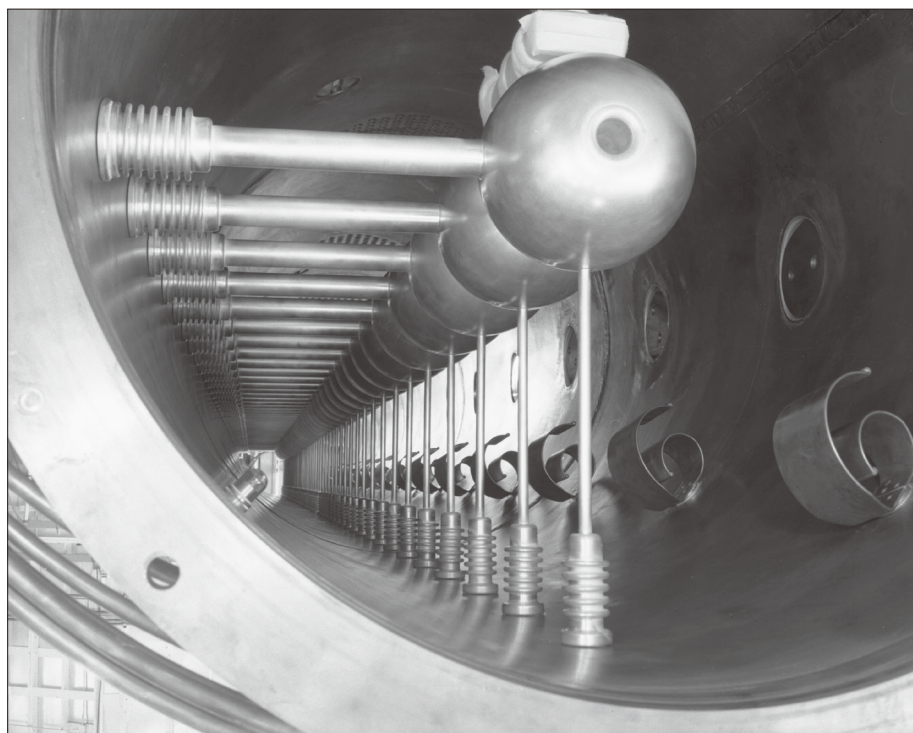
然而，狄拉克的理论不仅仅预言了正电子。狄拉克指出，将量子力学与相对论结合在一起，会获得一种新的对称性，它意味着实际上每种粒子都有相应的反粒子，带有相反的电荷（虽然某些粒子可以是自己的反粒子）。他的理论使宇宙中有待发现的粒子种类几乎增加了一倍——这在当时看来难以置信，不过最终被证明是正确的。

正电子的发现使物理学家的兴趣转向了反质子。反质子很可能是构造反物质的基本单元。例如，一个反质子可与一个反电子（亦即正电子）结合成反氢原子——实际上直到1995年它才被实现。然而与正电子（以及 μ 子）不同，物理学家无法在宇宙射线中寻找反质子，而必须在实验室中制造它。

问题是，在20世纪30年代，粒子加速器的能量仍远不足以产生反质子，因为，如欲产生反质子，必须同时创造一对质子和反质子。质子与反质子具有相同的“静质量”（也就是当其完全静止时所具有的能量），大约是10亿电子伏，更精确的数值是938兆电子伏（MeV）。因而，加速器至少需要达到20亿电子伏的能量。在当时，10亿电子伏被称为1BeV，现在称为1GeV（即1吉电子伏）。

4 正电子（positron）一名是就其带正电而言，反电子（anti-electron）则是就其为电子的反粒子而言。——译者注

欧内斯特·劳伦斯开始建造一台能量可达 65 亿电子伏的环形同步质子加速器，它随后被命名为“Bevatron”。为了向劳伦斯致敬，其所在地后来被称为劳伦斯伯克利实验室。1954 年开机时，Bevatron 是当时全世界最强大的粒子加速器。物理学家争分夺秒地建造这台机器，只为了一个主要目标——制造反质子。

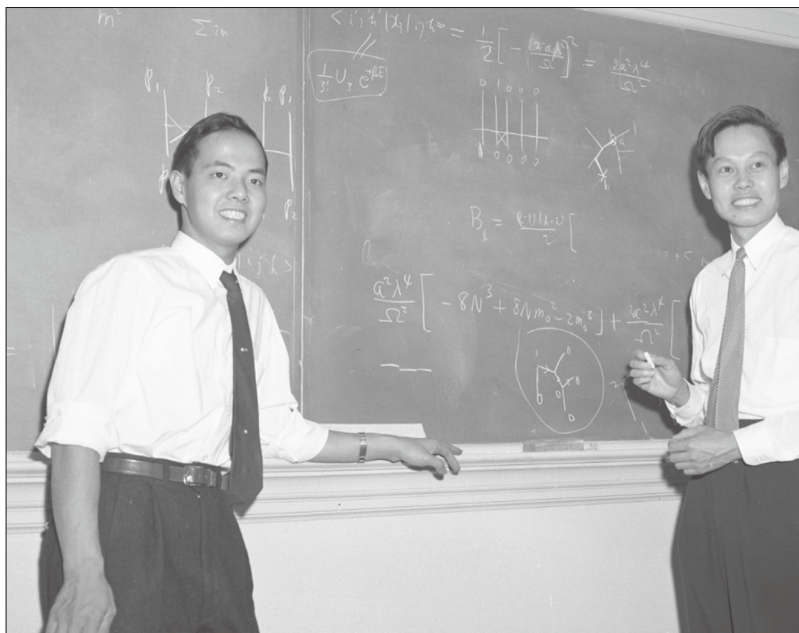


“漂移管”，Bevatron-2545 直线加速器的关键部分，约 1961 年。（照片由伯克利实验室提供）

由伯克利的物理学家埃米利奥·塞格雷（Emilio Segrè）与欧文·张伯伦（Owen Chamberlain）所领导的团队，通过测量出射粒子的动量与速度，在一年之内明确发现了 60 个反质子——与质子质量相同的带负电粒子。研究人员每确认一个反质子，都要剔除 4 万余个一同出射的无关粒子。^[13] 该团队于 1955 年 10 月 19 日宣布了他们的发现。翌年，由布鲁斯科克（Bruce Cork）领导的 Bevatron 科学家用反质子射向普通物质，首次创造并观察到了反中子。

宇称破坏

同样在 1956 年，理论与实验物理学界目睹了另一桩更为重大的事件：两位中国出生的物理学家——李政道（Tsung-Dao Lee）与杨振宁（Chen Ning Yang）——在《物理评论》上发表论文，主张自然定律从理论上讲并非总是对称的^[14]。他们的论文聚焦于“宇称”守恒的原理。这一 20 世纪科学界广为信奉的原理断言，任何物理过程与其镜像过程应当遵循相同的规律，导致相同的结果。换言之，物理过程对于左和右两者并无特别的偏好。实际上，人们相信自然并不区分左右。



李政道与杨振宁共事于普林斯顿高等研究院。（照片由 Alan Richards 所摄，新泽西州普林斯顿高等研究院 Shelby White 与 Leon Levy 档案中心提供）

李政道当时工作于哥伦比亚大学，而杨振宁在普林斯顿高等研究院。他们挑战了这一圣典般的假设，同时断定，在强相互作用与电磁相互作用中，可以排除宇称破坏的可能性，否则以往的实验数据早就应该显示这种破坏效应。然而他们发现，涉及弱相互作用的实验数据仍无定论。他们提出了若干弱作用过程，希望通过实验来检验这一长久以来备受尊崇的圣律。

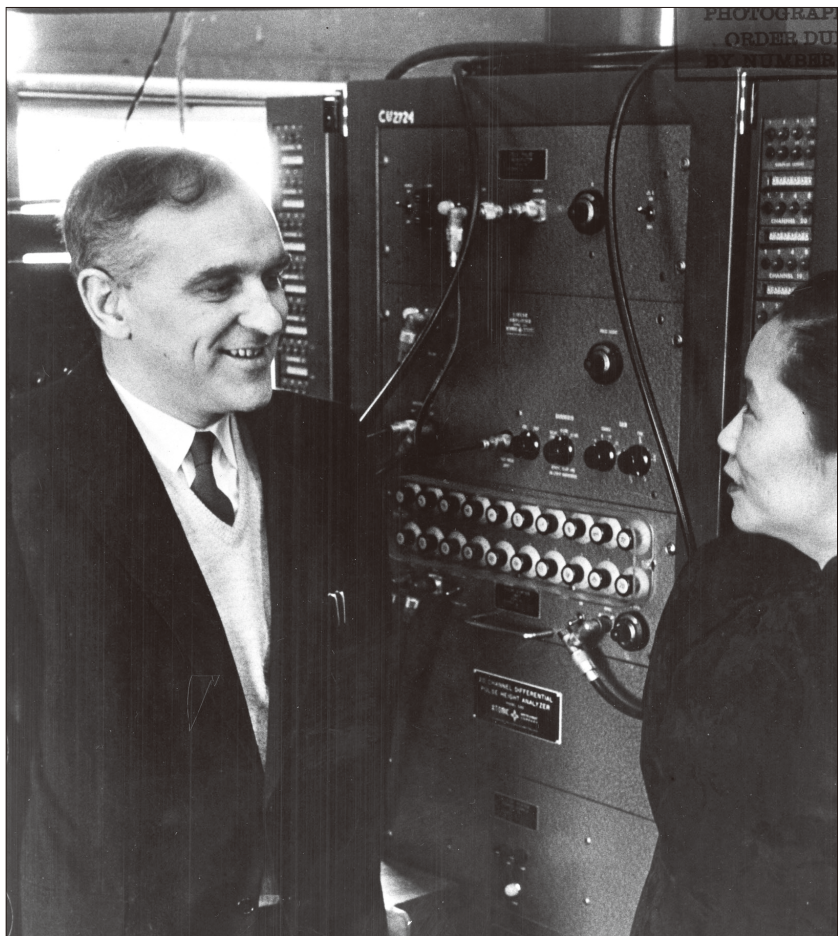
他们提出的一个例子涉及当时的加速器产生的两种亚原子粒子： τ 粒子与 θ 粒子。这两种粒子几乎完全一样：质量和自旋相同，寿命也相等——这里的寿命是指粒子在衰变前所能保持不变的时长。但是， τ 粒子衰变为 3 个更小的 π 介子；而 θ 粒子则衰变为两个 π 介子。由于衰变的结局相异，因此物理学家历来假设 τ 粒子与 θ 粒子是两种不同的粒子。但李和杨提供了另一种解释：如果宇称在弱相互作用中不守恒，那么 τ 粒子与 θ 粒子就可以是同一种粒子，只是衰变方式不同。因而，如果能够证实宇称破坏，就能化解这个所谓的 τ - θ 疑难。李和杨说，如果宇称在此处可以破坏，那么在其他情形下也能被破坏。

实验证据很快出现，李政道和杨振宁也因提出了自然规律不对称的首个证据，而成为最先获得诺贝尔奖的华裔科学家。此前，李政道与哥伦比亚大学的同事吴健雄（Chien-Shiung Wu）讨论了检验宇称的实验，得到了宇称破坏最初的间接证据。吴健雄也来自中国，被称为“中国的居里夫人”及“物理研究第一夫人”。她为此设计了一个实验，并与美国国家标准局（NBS）的同事在 1956 年夏天付诸实施。而之所以选择 NBS，是因为此处有将物质冷却到极低温度的设备^[15]。吴与她的同事将放射性同位素钴-60 冷却到仅比绝对零度高百分之一度，同时施加强磁场，使钴-60 原子核整齐排列并沿相同方向自转。接着，研究者仔细观测同位素在弱作用控制的衰变下所发射的电子。如果宇称守恒，那么从钴核自旋方向飞出的电子，应与相反方向飞出的电子一样多。吴测量到了清晰的宇称破坏，因为从自旋反方向飞出的电子更多。作家柯勒·布斯·露丝（Clare Boothe Luce）评论道：“吴博士击破了左右平等⁵，却证实了男女平等。”^[16]

当吴与国家标准局的物理学家验证他们的结果时，理查德·加尔文（Richard Garwin）、里昂·莱德曼（Leon Lederman）与马塞尔·温利希（Marcel Weinrich）在哥伦比亚大学的尼维斯回旋加速器上研究了 μ 子

5 “左右平等”与“宇称原理”在原文中一语双关。——译者注

衰变为电子与两个中微子的过程，找到了宇称破坏的又一证据。他们的论文与吴研究组的论文背靠背刊登在 1957 年《物理评论》的同一卷上。杰罗姆·弗里德曼（Jerome Friedman）与瓦伦丁·泰勒迪（Valentine Telegdi）在芝加哥大学同步回旋加速器上进行的 μ 子衰变实验同样展示了宇称破坏。弗里德曼与泰勒迪的论文出现在《物理评论》的下一卷（同样在 1957 年），可能是因为从芝加哥寄到纽约的出版社时晚了一天。^[17]



美国国家标准局的恩斯特·安布勒与哥伦比亚大学的吴健雄，摄于 1956 年成功完成实验之后。该实验显示了李政道与杨振宁所提出的宇称破坏。（照片由美国国家标准与技术研究所提供）

所有这些实验都毫无争议地展示了涉及弱作用力的过程与其镜像过程不必遵守相同的规律。这一发现将对称性破缺的概念带入了基础

物理中，影响深远。然而在当时，这一发现使人困惑不解。伊西多·拉比评论道：“一个相当完备的理论结构被彻底击碎，我们却不知道如何将这些碎片重新拼回来。”^[18]

与此同时，更多宇称破坏的例子在不断涌现。例如，1956年，研究者在伯克利的 Bevatron 上将质子与负 π 介子对撞，观察其产物（一种超子）的衰变。这正是李和杨所提议的实验，而伯克利团队首次在超子衰变中发现了宇称破坏——超子在分类上属于“重子”，将于稍后讨论。

共振态与奇妙的夸克

不久，伯克利的物理学家参与了另一项发现，通过此后一系列连锁反应，最终获得了重大突破。在 Bevatron 的一项实验中，他们创造出一个 Λ 超子与两个 π 介子的短暂结合，只持续了 10^{-28} 秒。这个短命的“粒子”是第一个被观察到的所谓“奇共振态”，并被标记为 $Y_1^*(1385)$ ——这里的数字是指它的静质量为 1385 兆电子伏。虽然此前曾观测到其他共振态，例如著名的费米 3,3 共振态，但是此项研究的领导者瓦尔特·阿尔瓦雷茨（Walter Alvarez）解释说：“ Y_1^* 共振态对粒子物理学家的影响大为不同； Y_1^* 看上去的确像一种新粒子。”阿尔瓦雷茨与同事在 1960 年罗切斯特高能物理会议上宣布了 Y_1^* 的发现。他回忆道：“人们就此开始认真考虑寻找更多这种短命粒子。”^[19]

到 60 年代末，伯克利研究组发现了另外两种共振态， $K^*(890)$ 与 $Y^*(1405)$ 。通过这些已知共振态的质量，物理学家估计出了另一种假想粒子的质量。这种假想粒子被称为“ Ω^- ”，加州理工大学的物理学家穆雷·盖尔曼（Murray Gell-Mann）与以色列物理学家尤瓦尔·涅曼（Yuval Ne'eman）曾分别独立提出理论，预言了该粒子的存在。然而，理论预测 Ω^- 的质量为 1676 兆电子伏，因而产生它所需的能量超出了 Bevatron 的能力范围。

1960年, 纽约布鲁克海文国家实验室的交变梯度同步加速器 (AGS) 取代 Bevatron, 创造了 33 吉电子伏 (GeV) 的能量新纪录, 成为当时的世界第一加速器。1964年, Ω^- 粒子在 AGS 上被发现。 Ω^- 粒子的发现, 以及早前发现的包括 Y_1^* (1385) 在内的诸多共振态, 为盖尔曼与乔治·茨外格 (George Zweig) 于 1964 年分别提出的夸克模型给予了很强的支持。茨外格当时是 CERN (欧洲核子研究组织, 位于瑞士日内瓦) 的访问科学家。

盖尔曼与茨外格的夸克模型是关于强子的理论。强子是一大类粒子的通称, 包括重子 (例如质子、中子) 和介子 (例如 π 介子)。其模型主张, 所有强子都是由更小更基本的组分构成的。盖尔曼从詹姆斯·乔伊斯 (James Joyce) 的小说《芬尼根守灵夜》中借用了“夸克”一词为之命名。与其他已知粒子不同, 夸克带分数电荷, 其带电量是电子与质子的三分之一或三分之二。

除了夸克, 强子还包含另两种基本组分: 一是反夸克, 即夸克的反粒子; 二是胶子, 这是与夸克相关的一种粒子, 将在本章稍后讨论。盖尔曼与茨外格的模型最初需要 3 种不同的夸克及相应的反夸克。不过物理学家至今总共已找出 6 种夸克, 以及 6 种相应的反夸克。所有强子 (包括质子和中子) 都由 3 个夸克构成, 而介子则由一个夸克和一个反夸克构成。

盖尔曼与茨外格在 60 年代初期提出这一模型时, 粒子物理学家正试图理解这些大量涌现的强子, 他们的数目似乎无穷无尽, 也没有明显的结构为其分类。夸克模型帮助物理学家为这一看似混乱的局面恢复了秩序, 它解释了所有已经发现和有待发现的强子, 都不过是同样 3 种夸克与反夸克的不同组合而已。

夸克模型有两个怪异之处: 其一是分数电荷的概念, 因为这从未在自然界观察到; 其二则是人们从未见到单独存在的夸克。此外, 一

些理论上的原因使人相信，独自漫游的夸克不可能被看到，这在粒子物理中是前所未有的。

“夸克不能被单独分离出来，就像弹簧不可能只有一个端点一样，”布鲁克海文的物理学家迈克尔·克罗茨（Michael Creutz）解释道（不过他坦承“弹簧也不可能有3个端点”）。^[20]根据这种解释，夸克只能成团出现，永久地被“禁闭”在强子中。不过即使这是事实，实验家们也有招数去一瞥夸克的身影。

事实上，20世纪60年代末与70年代初，物理学家开展了里程碑式的实验以探测质子的内部结构——就像60年前，卢瑟福探测了原子的内部结构并证实了原子核的存在，之后又发现了原子核的组分——质子和中子。现在，新一轮的实验旨在揭示质子的内部结构，它需要更大的新机器。1962年，斯坦福直线加速器中心（SLAC）完成了这一突破。这台设备最初被称为“M项目”，其中“M”代表魔鬼（monster），因为它当时是且至今仍然是最长的直线加速器，长度超过3.2千米。事实上，容纳这一加速器的建筑是美国最长，也是世界第三长的人造结构，仅次于前面提到的中国长城，以及巴基斯坦的信德长城（Ranikot Fort）——一个直径26千米的环形堡垒。

此前，斯坦福的物理学家在一些小型机器上用电子撞击质子，并通过观察其反弹来测量质子的尺寸。现在，SLAC供物理学家使用的电子束则强大得多，其能量最终达到了50GeV。物理学家有望借此更进一步，一窥潜藏在质子内部的景象。



俯瞰位于加州门洛帕克长达两英里的 SLAC 直线加速器（照片由 SLAC 国家加速器实验室提供）

新设备于 1967 年竣工，由斯坦福的理查德·泰勒（Richard Taylor）与杰罗姆·弗里德曼，以及麻省理工学院（MIT）的亨利·肯德尔（Henry Kendall）所领导的实验也于同年启动，并一直持续到 1973 年。研究者将加速后的电子射向液氢靶——氢原子核即质子。恰如卢瑟福与合作者将 α 粒子撞向金原子并仔细观察其结果那样（某些 α 粒子以大角度散射），弗里德曼、肯德尔与泰勒研究质子对电子的散射。最初，很难辨认出什么图样。“数据到处散落，”肯德尔评论说，“就像小孩子乱画的图。”^[21]



亨利·肯德尔、杰罗姆·弗里德曼与理查德·泰勒相聚在斯德格尔摩领取 1990 年的诺贝尔物理学奖。（照片由 Lars Åström 所摄，诺贝尔基金会提供）

然而斯坦福的理论家詹姆斯·毕约肯（James Bjorken）帮助研究者换了一种方式，重新整理了数据，图像就变得清晰多了。他们发现，多数穿过靶子的电子基本上未受干扰，但是有数量可观的电子以大角度散射。这一证据显示，质子的质量与电荷集中在 3 个独立的点状疙瘩上，大概就对应于盖尔曼与茨外格所设想的夸克。后来认定，质子由 2 个“上”夸克与 1 个“下”夸克构成，而 1964 年发现的 Ω^- 粒子则由 3 个“奇”夸克构成。（虽然这样说没有错，然而我们现在知道，质子

与其他强子的结构比这种简单的图像更为复杂，我们将在下一章回到这一点。)

一年之内，在 CERN 进行的实验使用质子散射一种称为中微子的很轻的粒子（我们将在本章稍后简要讨论，并在第 4 章展开介绍），做出了相似的发现。据肯德尔说，电子与中微子散射实验的结果相互补充，使质子包含夸克这一推断更为确凿。^[22]

然而，由于分数电荷的困惑，也因为夸克自身仍未被看到，夸克模型直到数年之后才被广泛接受。SLAC 实验的结果表明，这些东西就在核子中运动，但是没有人知道这些东西——包括夸克——为什么只在核子内跑来跑去，而从不跑出来。

理论的洞见出现于 1973 年末。戴维·格罗斯、弗兰克·维尔切克与戴维·波利策（David Politzer）为夸克囚禁提供了一种解释，名曰“渐进自由”，并因此获得 2004 年的诺贝尔奖。他们的核心想法是，原子核及核子的各个组分是因强作用力结合在一起的。这种作用力有如橡皮筋一般牢牢抓住夸克。夸克彼此分开得越远，这种作用力就越强。事实上，这种作用力如此强大，以至于夸克，以及它们相互交换的荷力粒子（名曰胶子）从未能被拉开成孤立的粒子。他们的理论认为，夸克与胶子被紧紧囚禁在质子（以及其他强子）内部。它们在这一有限的区域内几乎可以自由移动，而且速度极快。事实上，胶子是质量为零的粒子，它以光速运动。然而，胶子与夸克间强大的吸引力让它们永远无法从核子中脱身。

从新夸克到胶子与 QCD

另一个意料之外的新发现也给予夸克模型一臂之力——在美国东西海岸两处同时进行的实验中出现了一种新粒子，使多数物理学家颇感意外。MIT 的丁肇中（Samuel Ting）教授 20 岁前几乎一直在中国，

对于宇宙中只存在 3 种已知的夸克（上、下、奇夸克）颇感怀疑。他设计了一个实验去寻找更多夸克。

这一想法并非荒诞不经，因为哈佛的物理学家谢尔顿·格拉肖（Sheldon Glashow）与詹姆斯·毕约肯在 1964 年已经指出，第 4 种夸克应当存在，格拉肖将其命名为“粲”（charm）⁶，不过当时几乎没有证据表明它存在。然而，格拉肖、约翰·伊里奥普洛斯（John Iliopoulos）与卢查诺·迈安尼在其 1970 年的论文中，提出了一种后来以他们的姓氏缩写命名的 GIM 机制，解释了为何第 4 种夸克必须存在。对粲夸克的预言通常归功于这 3 位物理学家。

数年后，丁肇中着手寻找粲夸克。然而他没有得到多少鼓励，这或许是因为已知的 3 种夸克似乎足以解释当时已见到的所有现象，物理学家对此已经心满意足了。他们觉得寻找别的夸克很可能会空手而归。

不过实验家丁肇中自有主见，他一旦拿定自己喜欢的主意就不会因为某些理论家的劝告而退缩。“我乐意与理论家共进中餐，”据说他曾这样讲，“但是花一辈子时间去做理论家告诉你的事情就是浪费时间。”^[23]

几个主要实验室都拒绝了丁肇中的提议，但他坚持不懈，并最终在布鲁克海文的 AGS 获得机会，^[24] 彼时该机器已经被 CERN 和斯坦福的机器超越。他于 1972 年春天在布鲁克海文开始实验，一直持续了两年多。在 1973—1974 年的实验中，丁肇中与研究者让质子束射向铍靶，以产生次级强子流。丁肇中猜测一种新的强子将会衰变成电子与正电子。1974 年 8 月，他果然在一堆数据中偶然发现了电子-正电子对——实实在在的异常。通过小心测量这对粒子的能量，丁肇中断定产生这

6 “Charm”的中译名“粲”来自物理学家兼汉字专家王竹溪先生，取《诗经·国风·绸缪》中“今夕何夕，见此粲者”之意，实属音义合译。——译者注

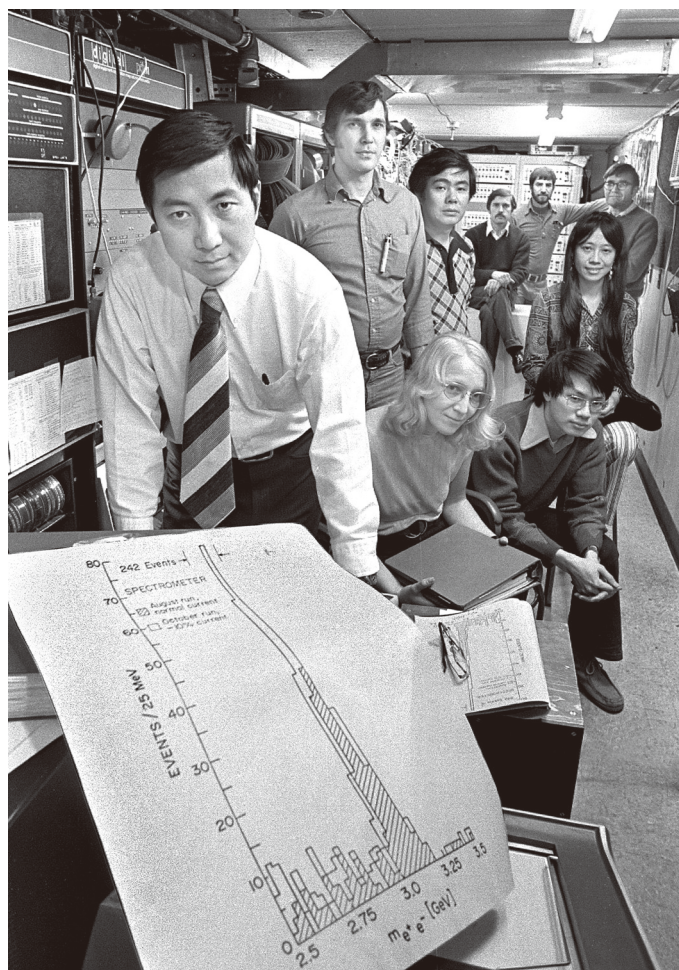
个电子-正电子对的神秘粒子比当时发现的大多数粒子还要重,其质量达到 3.1GeV , 大约是质子质量的 3 倍。更奇怪的是,该粒子相当长寿:当然,它的“存活”时间远不足 1 秒,大约只有 7 仄秒(亦即 7×10^{-21} 秒),但仍然比预期长了上千倍——这一发现迥异于物理学家对基本粒子的理解。^[25] “世界上大多数人活不过 100 岁,”丁说,“但是设想你发现了一个村庄,这里每个人都能活一万年甚至十万年。这些人必有不同寻常之处。”这一说法同样适用于他所发现的新粒子。^[26]

丁肇中断定,他在 AGS 所捕获的粒子之所以表现出这些不同寻常的性质,是因为它包含一种前所未见的夸克(后来被确定就是粲夸克)及其反夸克。他将这种粒子命名为“J”,因为这个字母与他的姓氏“丁”形似⁷。^[27] 丁原本有机会成为 J 粒子与粲夸克的唯一发现者,然而为了得到绝对确定的结果,他一丝不苟地坚持将实验以不同方式重复了好几遍。

丁肇中于 1974 年秋造访加州时,意外获知由伯顿·里克特(Burton Richter)领导的一个 SLAC 实验组发现了一种很重的新粒子,同样具有 3.1GeV 的质量,他们称之为“ ψ ”。丁肇中与里克特于 1974 年 11 月 11 日在斯坦福会面,很快就清楚了,他们发现了同一种粒子,随后将其命名为“ J/ψ ”,同时也获得了第 4 个夸克即粲夸克的实验证据,因而证实了由格拉肖、伊里奥普洛斯与迈安尼在 4 年前发展的理论。丁肇中与里克特分享了 1976 年的诺贝尔奖,丁肇中也是首位以汉语发表获奖致辞的诺贝尔奖得主。^[28]

7 文献中通常有一个误会,以为取名“J”就是暗示用汉语表达的“丁”粒子。其实,按照丁肇中的原意,他是希望用“J”表示熟知的电磁流,以纪念他的团队花了 10 年的功夫探索电磁流的性质才获得这项惊人的新发现。参见《丁肇中传》第 93 页,周金品著,科学出版社 2006 年出版。——译者注

从某种意义上说，这仅仅是开始。因而 1974 年 11 月丁肇中与里克特的会面，以及当天稍后宣告其共同发现，被称为引发了“十一月革命”。这一突破的意义不仅在于发现了一种新粒子。很快，人们预测了携带不同数目粲夸克的新重子与新介子，其中一些已在 SLAC 找到。例如， J/ψ 的一个近亲—— ψ' ，仅仅在 10 天之后就被发现，只有用粲夸克才能解释其性质。故而， J/ψ 的发现远不止确证了粲夸克的存在，更巩固了整个夸克模型，令人信服地展示了物质结构的新层次。而这一发现引起的“革命”为原本莫名其妙的粒子世界带来了秩序与逻辑。新的粒子分类法，连同一套全面的理论解释，开始成形。



丁肇中与 1976 年共同发现 J/ψ 粒子的实验团队成员，丁肇中因此分享了 1976 年的诺贝尔物理学奖。（照片由布鲁克海文国家实验室提供）

既然已有第4个夸克的确凿证据，物理学家就有信心去继续探寻。1973年，两位日本物理学家（后来的诺贝尔奖获得者）小林诚（Makoto Kobayashi）与益川敏英（Toshide Maskawa），提出了存在另外两种夸克的有力论据，这两种夸克后来被命名为“底”与“顶”。小林与益川指出，1964年首次发现的粒子与反粒子间的对称性破缺，需要由一个新的夸克“家族”来解释。

与此同时，另一条线索也显示，可能还有两种新夸克有待发现。这条线索与另一种对称性有关：1974年粲夸克的发现使很多物理学家相信，夸克与轻子似乎可以编成对，亦即有一种对称性。虽然当时对夸克与轻子间的联系尚无透彻的理解，但这仍然提示，夸克与轻子的数目必须相同。根据这种看法，上夸克和下夸克对应于电子和中微子。与此类似，更重的奇异夸克与粲夸克对应于 μ 子和 μ 中微子。1975年SLAC的物理学家马丁·珀尔（Martin Perl）发现了一种新轻子—— τ 子。它是电子的近亲，但比电子重3500倍。于是产生了困惑：如果上述结构成立，就意味着 τ 子归属于夸克与轻子中的第3组，这一组居于更高的能量尺度，它的其他成员还未被发现。珀尔对此解释颇有信心，因而将这个粒子命名为 τ （即希腊序数词“三”的首字母）。尽管面对广泛的质疑，他仍然相信自己所发现的粒子实则“第3个荷电轻子”。1977年，在德国汉堡的DORIS电子-正电子加速器上，人们才逐渐确认 τ 子确实是电子与 μ 子的近亲，是一个轻子。^[29]

同年，在位于芝加哥城外的费米国家加速器实验室（以意大利出生的物理学家恩里科·费米的名字命名），研究者发现了一种新粒子—— Y 介子，它由底夸克（ b ）及其反夸克构成，因而证实了预测的两种夸克之一。另一个假想的粒子——顶夸克（ t ），也发现于费米实验室，但那已是1995年的事了。

多数物理学家确信，6种已知夸克之外没有更多夸克。不过回到20世纪70年代，尚有一个突出的问题有待回答：是什么将夸克捆在一起？

这一问题的线索来自 SLAC 的物理学家弗里德曼、肯德尔与泰勒的实验。该实验的结果暗示，质子除了藏有 3 种点状的夸克，还包含一种电中性的组分，后来被确认是胶子——之所以如此命名，是因为这种粒子将夸克牢牢粘在质子、中子，以及其他强子中。

1976 年，3 位理论家——约翰·艾利斯（John Ellis）、玛丽·盖拉德（Mary Gaillard）与格雷姆·罗斯（Graham Ross）——发表论文，提出用电子与正电子湮灭（即电子与正电子对撞而同归于尽）的方式寻找胶子。他们论证，这种对撞将会产生独特的信号，称为“三喷注事件”，它包括从对撞区域飞出的一个胶子、一个夸克与一个反夸克。艾利斯当时说道：“理论家不大怀疑胶子的存在，但是直接证实其存在，得到一杆‘冒烟的枪’⁸一样的胶子信号，仍然很难做到。”——至少在随后若干年里的确如此^[30]。与此同时，1977 年中，托马斯·迪格兰德（Thomas Degrand）、吴汝哲（Jack Ng）与戴自海（Henry Tye）发表了另一篇关于三喷注事件的重要论文；该年末，乔治·斯德曼（George Sterman）与斯蒂芬·温伯格也就此问题发表了论文。

1979 年，在德国的国立研究中心 DESY 新投入使用的机器 PETRA 上，4 组独立的实验分别探测到了胶子。PETRA 是当时世界上最强大的电子-正电子加速器，能够产生 40GeV 的对撞能量。^[31] 最早的结果出现于 1979 年 6 月，来自 TASSO 探测器的合作组。TASSO 的研究员吴秀兰（Sau Lan Wu）与合作者格奥尔格·曹伯尼希（Georg Zoernig）观察到第一个“三喷注事件”——因而肯定了由艾利斯与合作者提出并由其他理论家完善的一般策略。

欧洲物理学会将胶子的发现归功于 TASSO 实验组的 4 位领导者：吴秀兰、保尔·索丁（Paul Söding）、毕约恩·维克（Bjørn Wiik）与君

8 “冒烟的枪”是英语中的常用短语，出自福尔摩斯的故事，指相当确凿的证据。——译者注

特·沃尔夫（Günter Wolf）。同时，PETRA 的其他 3 个实验组在 1979 年的夏天也做出了重要贡献，其中包括丁肇中领导的一组（顺便提一句，在香港出生长大的吴秀兰此前也参与了丁肇中领导发现 J/ψ 的研究组。）4 个实验组都观测到三喷注事件，证实了胶子的存在。这 4 个实验组在 1979 年秋天费米实验室的专题会议上展示了他们的结果，首次公开宣布观测到胶子。^[32]

PETRA 实验支持了胶子传递强相互作用的概念。换言之，胶子传递的强作用力克服了夸克间（以及质子间）的电斥力，像“胶”一样将夸克粘在质子中，也将质子粘在原子核中，阻止其自由飞行。

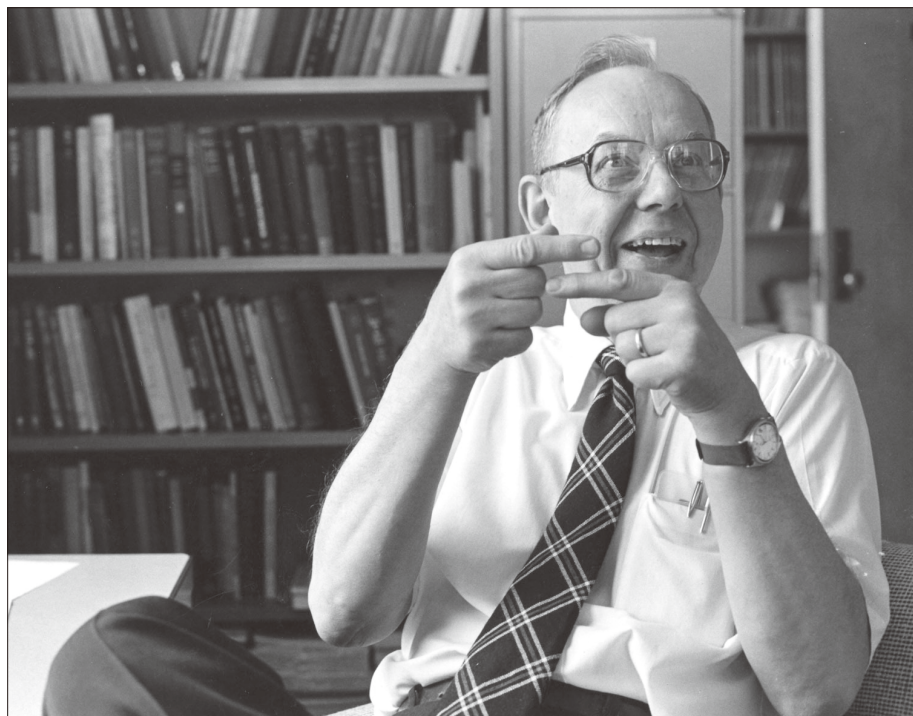
胶子的发现增强了人们对量子色动力学（QCD）的信心，使 QCD 被公认为强相互作用理论。QCD 描述了夸克与胶子间的相互作用，同时描述了由夸克构成的复合粒子，如质子、中子，以及更多不稳定的重子与介子。MIT 的物理学家弗兰克·维尔切克将 QCD 称为“QED 扩展版”，这里的 QED 即量子电动力学，它描述了电磁力如何将原子拢在一起，以及光与物质如何相互作用。^[33] 根据 QED，带电粒子通过相互传递光子（亦即光的粒子）而发生电磁作用。在所有电磁作用过程中，电荷都守恒。

与此相仿，在 QCD 中，强作用力由类似光子的胶子传递。QCD 也有一种荷，称为“色荷”，它与我们日常所见的颜色毫无关系，但与 QED 中的电荷类似。QCD 的色荷有 3 种，在物理过程中也保持守恒。强相互作用的理论只涉及带色荷粒子的行为，包括夸克与胶子。

从规范对称性破缺到发现 W 和 Z 粒子

QCD 的理论基础是杨－米尔斯理论，这一影响深远的理论由杨振宁与罗伯特·米尔斯（Robert Mills）于 1954 年提出，即杨振宁在布鲁克海文遇见米尔斯的一年之后。杨－米尔斯理论的一个核心特征是规范不变性的概念。非常粗浅地说，规范不变性是指，运动方程及所有重

要的物理观测量在某种坐标变换下保持不变。举例说，从 100 米高处扔下的物体，落地时的速度都相同，这与究竟是从 100 米高的楼顶扔下还是从 100 米高的悬崖扔下无关。这个例子展示了一种更为广泛的规范不变性，即物理定律不会随空间中的平移或旋转而改变。



罗伯特·米尔斯在位于俄亥俄州立大学的办公室，约 1999 年。（照片由俄亥俄州立大学档案馆提供）

在 QED 及描写万有引力的广义相对论中，规范不变性都是指导原则。20 世纪 40 年代末，杨振宁对此产生了兴趣。他想知道，规范不变性是否也能为强作用力与弱作用力提供理论基础。然而直到 1953 年与米尔斯合作后，他才开始集中钻研这个问题。^[34]

规范对称性的引入最终产生了一个“美妙的理论”，斯蒂芬·温伯格说，“因为（在该理论中）对称性支配相互作用。”^[35] 杨－米尔斯理论不仅优美，其应用同样成果丰硕。我们现在知道，强作用力的确能用杨－米尔斯理论描述。

弱作用力亦可用杨-米尔斯理论描述。与强作用类似，弱力也只在原子核内起作用。只不过，强力的作用是将核子粘在一起，而弱力的效果则是使核子发生各种变化。尤为重要的是，弱力使粒子通过放射性衰变转化为另一种粒子，比如中子衰变为质子、电子与反中微子，又如质子变成中子的逆过程。放射性衰变使地球内部保持高温，从而使板块运动乃至生命活动成为可能。此外，核聚变亦由弱作用控制，太阳因此而发光，恒星内部的化学元素因此而合成。

然而在1954年2月两人合作伊始，杨-米尔斯理论就遇到一个重要难题，这一问题在杨振宁主讲的一次普林斯顿的讨论会上暴露了出来。量子力学的奠基者之一沃尔夫冈·泡利（Wolfgang Pauli）当时在场，他盯住该理论中用以传递强弱作用的玻色子，不停诘难杨振宁。杨此前已意识到这一问题，而泡利恰好问到了要害：杨-米尔斯的方程预测，强弱作用力都由无质量、电中性的玻色子传递，因为规范对称性要求这些玻色子必为零质量粒子。然而我们在自然界中从未见过这种粒子，如果无质量的规范玻色子存在，它们必然已出现在此前的加速器实验结果中。^[36]泡利之所以知道这一点，是因为他自己曾推导出与杨-米尔斯类似的方程。但是泡利没有继续推进他的研究，他解释说，因为这总会导致“静质量为零”的玻色子^[37]。而如果一个试图描述自然的理论却描述了一些似乎不可能存在的东西，那还留之何用？

然而这个理论中的数学太美妙了，杨和米尔斯不愿就此放弃。他们仍然希望找到一种办法，解决强弱作用力的无质量玻色子问题，以挽救他们的理论。根据1964年提出的夸克模型，夸克与胶子必被囚禁于核子中。这提供了一种可能的出路，以绕开泡利对强作用荷力粒子的诘难，而其关键在于“禁闭”的量子机制。虽然胶子确实是带色荷的无质量粒子，但是它永远被囚禁在核子与其他强子中，所以在自然界中胶子永远不会自由出现。这解释了为什么当时没有观测到胶子，

以及胶子为什么比同为无质量粒子的光子更难被看到（颇有讽刺意味的是，光子恰恰是唯一能被肉眼所见的粒子。）

这种解释适用于强作用力的玻色子（即胶子），而弱作用力仍然是个麻烦。如果按照杨－米尔斯理论的预言，弱作用力由无质量玻色子传递，那么它应当是长程力，就像电磁力。电磁力由无质量的光子传递，其作用范围几乎无限远。但对于弱作用，这并未被观察到，而且实际情况恰恰相反：弱力在已知的作用力中力程最短，这意味着它的荷力粒子必须非常重。一般而言，越重的粒子平均寿命就越短，故而承担弱作用的粒子不会存活太久，它还未走远就会衰变成其他轻粒子——这将弱作用的力程限制在很短的距离，正如观测所见。

理论与实验由此发生冲突，然而在粒子物理大事件层出不穷的1964年，物理学家找到了弥合裂缝的办法。这种新的想法指出了，弱玻色子如何一开始并没有质量，而后来又获得质量。

这一概念后来被称为“希格斯机制”⁹，下章将着重介绍。此处我们不进入该话题，而是径直跳到1967年。这一年，谢尔顿·格拉肖、阿卜杜勒·萨拉姆（Abdus Salam）与斯蒂芬·温伯格利用希格斯机制这种前卫的想法，写下了“标准模型”的关键部分。标准模型是试图囊括并描述一切已知粒子的全面理论。格拉肖、萨拉姆与温伯格的关键性贡献，不仅使我们对弱作用力与弱玻色子的认识前进了一大步，同时还揭示了弱力与电磁力之间前未知的关联。

一个世纪前，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）揭示了电、磁、光的现象同出一源，皆可统一于电磁力。在此基础上，以上3位20世纪的物理学家进一步发现，尽管电磁力（关乎电、磁、光）与弱作用力（关乎放射性衰变）在日常世界表现迥异，但在高能区域，

9 亦称为 Brout-Englert-Higgs (BEH) 机制。——译者注

在早期宇宙的高温环境下（大爆炸之后的千亿分之一秒内），它们将被统一成为一种“电弱”力，此时两者行为完全相同，不可区分。

然而在宇宙演化史中的那一瞬间之后，两种力分道扬镳。电磁力就此由无质量、电中性的光子传递，而弱力则由3种有质量的粒子传递，称为中间矢量玻色子——包括带正电的 W^+ 、带负电的 W^- ，以及电中性的 Z 。

不过电弱理论最初有一个非同小可的困难：当你用它做计算时，总有一些无穷大不断冒出来，这导致了相当的麻烦，甚至使理论中的一些诱人之处变得可疑。电弱相互作用的理论如若真的有用，就必须“可重整化”。也就是说，必须将无穷大消除。20世纪60年代末的普遍看法是，包含希格斯机制的电弱理论不可重整化。在当时，很难详细计算 W 与 Z 粒子的性质，也很难避免得到不可理喻的结果。因此之故，许多物理学家对这个新理论并不看好。

1971年，乌特勒支大学的研究生杰拉德·埃图夫特发表了两篇论文，指出了如何将电弱相互作用重整化，从而打消了对电弱理论的普遍怀疑。埃图夫特的导师马丁努斯·韦尔特曼（Martinus Veltman）是该研究方向的先驱。1972年，师生二人就此又共同发表了数篇论文。由于他们的工作，电弱理论如今有了更稳固的基础，对 W 与 Z 粒子的质量与其他性质也能做出更精确的预言。

格拉肖、萨拉姆与温伯格因首先发展了电弱理论而获得1979年的诺贝尔奖，尽管当时 W 与 Z 粒子尚未被发现；20多年后，埃图夫特与韦尔特曼于1999年获得诺贝尔奖，而此时 W 和 Z 粒子已在实验上大量产生。对这项实验进展，在哈佛与CERN工作的意大利物理学家卡洛·鲁比亚（Carlo Rubbia）功不可没。

鲁比亚与威斯康星大学的戴维·克莱恩（David Cline），连同当时在哈佛的彼得·麦金泰尔（Peter McIntyre），提出了用物质与反物质粒

子对撞以产生 W、Z 粒子的方法。他们的提议最初反响冷淡，但是鲁比亚坚持不懈。^[38] 他将这一主意带到 CERN，并以他强有力的个性，建议改造现有的超级质子同步加速器（SPS）。SPS 当时将质子射向固定靶，而鲁比亚建议改造 SPS，使两束反向运行的质子与反质子对撞。质子与反质子湮灭所产生的能量，将远高于该机器原先的设计。鲁比亚宣称，这一巨大的能量将制造一大批新粒子，而 W 与 Z 粒子几乎必在其中。

他最终说服了众人。1978 年 6 月，CERN 批准对 SPS 进行改装。^[39] 不到 5 年后，在 1983 年 1 月，W⁺ 与 W⁻ 粒子就被发现了；稍重一些的 Z 粒子也于其后数月被发现。一如预期，这些粒子相当重——分别重达 80.4GeV 和 91.2GeV，其寿命仅为 10^{-25} 秒。^[40] 这些 W 与 Z 粒子的质量与其他性质，与电弱理论的预期相当接近。鲁比亚与他的同事、改装 SPS 的工程师西蒙·范德米尔（Simon Van der Meer），于翌年获得诺贝尔奖。

与此同时，CERN 已开始考虑大型电子-正电子对撞机（LEP）的项目，计划将电子与正电子在直径 27 千米的环形轨道上沿相反方向加速。LEP 目前仍是世界上最大的电子-正电子加速器，其主要目标是大量制造 W 与 Z 粒子，以仔细研究其性质。而在 LEP 建造之前，已经出现了利用原有 27 千米隧道将其升级为质子对撞机的计划。

在加速器物理领域，1983 年引人注目。这一年，费米实验室投建 Tevatron，它在此后 15 年中一直是世界上最强大的加速器。Tevatron 因其对撞能量而得名——它可实现 2TeV 的质子-反质子对撞，从而将高能物理带入太电子伏（TeV）的新纪元。Tevatron 是首个使用超导磁铁的大型加速器，它使用了 1000 个超导磁铁。其线圈被冷却到大约 5 开尔文，在此低温环境下线圈可无电阻无能耗地传输大量电流。Tevatron 的超导磁铁可产生比常规磁铁更强的磁场，它可使粒子束沿 6.5 千米的环状轨道前进，而由轨道上的电压将这些粒子加速到很高的能量。

Tevatron 做出了许多关键发现，包括前文提到的 1995 年发现的顶夸克（t），也就是预期 6 种夸克中的最后一种。2000 年，Tevatron 研

究组首次获得 τ 中微子的直接证据，它是电子的远亲，或许也是最后被发现的轻子。

从 1897 年汤姆森发现电子是亚原子粒子，直到 2000 年 τ 中微子的发现，这大约一个世纪的时间内，实验物理学家满载而归：他们捕捉到了大约 200 种粒子——其中 17 种（包括最晚发现的顶夸克与 τ 中微子）被认为是自然界的基本结构单元。

标准模型的宏伟大厦

当然，粒子物理不只是为了发现新粒子。此类发现固然绝对重要，但理论家还需要帮助实验家理解其结果。理论家们马不停蹄，在过去几十年中发展了一个宏大的理论框架，以描述宇宙中所有已知粒子，以及除万有引力外的所有作用力：强、弱和电磁。（引力极其微弱，因而在多数粒子相互作用中几无贡献，它由爱因斯坦于 1915 年提出的广义相对论单独描述。）这组描写基本粒子及其相互作用的方程，或曰超级数学结构，称为标准模型。标准模型在 20 世纪 70 年代已大体成形，自那以后实验家已经对其方方面面做了检验。密歇根大学的粒子理论家戈登·凯恩（Gordon Kane）解释说：“我们的世界所发生的一切，除引力效应外，都是标准模型粒子按照其规律与方程相互作用的结果。”^[41]

奇怪的是，这种规模与预言力都无与伦比的理论却得到如此平庸且略有误导性的名字。“标准模型是个错误的名字，”诺贝尔奖得主杰拉德·埃图夫特（在 2014 年 2 月于北京举办的巨型对撞机论坛上）评论道。“最初人们视之为试验品，因而称其为‘模型’，”对此理论做出重要贡献的埃图夫特说，“但是这个在信封背面就能写下的东西，结果却是正确而精准的。它描述了我们见到的一切，而且成功通过了所有检验。标准模型如今已成为基本粒子的标准理论。”^[42]

标准模型是量子场论登峰造极的典范。量子场论这种数学框架将量子力学的原理与狭义相对论熔于一炉，同时用场的概念描写作用力

与粒子。浅显地看，标准模型如同化学元素周期表，只不过这里的“元素”是粒子而非原子或化学物质。标准模型的所有已知粒子可分为两类：费米子，它们构成物质；玻色子，它们传递作用力，将物质结合在一起，或以其他方式与费米子相互作用。费米子包括参与强作用力的所有夸克，以及所有轻子——轻子不同于夸克，是不参与强作用、可在空间中自由穿行的较轻粒子，电子即其中一员。此外，还有一些夸克与轻子的复合粒子也是费米子。质子与中子被归类为“重子”（其英文名“baryon”源自希腊词“重”），重子包含3个夸克；而 π 介子被归类为“介子”，得名于希腊词“中间重量”，因为它们较轻，包含一个夸克与一个反夸克。

前面提到，物理学家已经确认了6种（或曰6“味”）不同的夸克，但是暂时没有足够的理由相信还有更多。他们也确认了6种不同的轻子，同时，每种夸克和轻子都有其反粒子。

电子是最早被确认的轻子。40多年后发现的 μ 子，是比电子重的近亲：事实上， μ 子除了比电子重大约200倍外，与电子几乎完全相同。 τ 子又比其近亲——电子重3500倍以上。轻子中还包括3种电中性的粒子，称为中微子。

中微子的存在最初由泡利于1930年推测出。他观察到，在质子与中子相互转化的放射性 β 衰变过程中，除了发射出一个电子外，初态的能量似乎丢失了一部分。这陷入了一个两难的境地：或者需要接受能量不再守恒，或者必须假设还有另一种粒子——它必须很小，不带电，毫不起眼地带走了能量。泡利选择了后者，几年后恩里科·费米将这种假想粒子以意大利词命名为“中微子”。在写给一群核物理学家的信中，泡利坦言他最初是孤注一掷：“我如今做了一件大坏事，提出了一种不可被探测到的假想粒子。理论家绝不该这么做。”^[43]

泡利孤注一掷的猜想终获证实，尽管这已是几十年之后的事。1956年，在南卡罗莱纳州美国政府的核反应堆附近，克莱德·科万（Clyde

Cowan) 与弗雷德里克·莱尼斯 (Frederick Reines) 所进行的实验发现了第一种中微子, 也就是所谓的电子中微子。 μ 中微子于 1962 年在布鲁克海文的 AGS 加速器被发现。前面还提过, τ 中微子于 2000 年发现于费米实验室。^[44]

标准模型将 6 种夸克与 6 种轻子分为 3 个家族, 或曰 3 代 (见表 1)。每一代包含 2 种夸克、1 种电子或其荷电近亲 (μ 子或 τ 子), 以及 3 种中微子的一种。第 1 组粒子最轻、最稳定, 同时也最为人熟知。事实上, 我们在日常世界所见的一切物质都仅由 3 种粒子构成: 上夸克、下夸克、电子——它们同属第 1 代。如前所述, 质子由 2 个上夸克与 1 个下夸克构成, 而中子则包含 2 个下夸克与 1 个上夸克。质子、中子、电子构成了原子、分子, 最终构成了人体乃至整个地球。

第 2 代粒子较第 1 代更重、更不稳定, 第 3 代则更加如此。所有这 3 代粒子及其结合, 构成了我们在自然界中所见的一切物体, 包括高能加速器中昙花一现又转瞬即逝的粒子。

自然界有 3 代费米子而不是 1 代或 4 代, 对于多数物理学家, 这仍是未解之谜。标准模型自身并不回答为何如此, 或许今后会有更深刻的理论能够回答。

表 1 3 代基本粒子

第 1 代	第 2 代	第 3 代
上夸克	粲夸克	顶夸克
下夸克	奇夸克	底夸克
电子	μ 子	τ 子
电子中微子	μ 中微子	τ 中微子

自然界的力由荷力的玻色子传递。电磁力由光子传递——各种能量的光在亚原子尺度的表现恰如粒子。两个粒子间通过交换光子而发

生电磁相互作用。3 种 W 和 Z 粒子则传递弱作用力，导致放射性衰变及其他过程。胶子，强作用的荷力粒子，共有 8 种。它们将夸克紧紧束缚在质子、中子与介子中，同时将质子、中子紧紧束缚在原子核中。

将夸克与轻子（以及反夸克与反轻子），连同玻色子并置一堂，就得到了物理学家借以描述粒子与力（除了引力）的所有原料，它们填充并塑造了我们的宇宙。标准模型兼收并蓄，但离完美无缺尚有距离。例如，引力很难被简单地整合于其中。标准模型也不能解释为何粒子的质量如其所是。尽管有这些局限，该理论能够精确地描写能量尺度相差巨大的各种物理现象，仍然是巨大的成功。

“粒子物理标准模型是科学史上最成功的理论，”费米实验室的物理学家丹·胡珀（Dan Hooper）宣称，“自其诞生至今的数十年里，标准模型的无数预言尚无任何一例被发现是错的。”^[45]此模型能够精确预测特定粒子（如 W、Z 粒子及顶夸克）在加速器上的产生率、衰变率与衰变产物。它能够以 12 位有效数字的精度预测电子对磁场的响应，以大约 8 位有效数字的精度预测 μ 子对磁场的响应。^[46]

标准模型横扫万物的巨大成功，令不少物理学家百感交集：对于下一步向何处去，他们感到疑惑。杰罗姆·弗里德曼在 1990 年与理查德·泰勒、亨利·肯德尔分享诺贝尔奖之后，随即表达了这种不安。他们的研究加固了夸克模型，以及描写强作用的量子色动力学，为标准模型的成功铺平了道路。“这个理论的惊人成功令人沮丧，”肯德尔说，“今后将无事可做。”^[47]

肯德尔所表达的这种感伤，肯定不乏心有戚戚者。它尽管不无正确之处，但却言过其实。因为无论在当时，还是 10 年之后（即 2000 年 τ 中微子的发现，标志着所有夸克与轻子被确认发现），这一理论仍有缺陷。从某种意义上说，这种“缺陷”恰恰是最重要的。否则，标准模型这个高能物理领域百年以来惊人成就的集大成者，将会轰然倒下。

参考文献

- [1] Erik Gregersen. *The Britannica Guide to the Atom*. (New York: Britannica Educational Publishing, 2011), p. 32.
- [2] Dan Hooper. *Nature's Blueprint*. (New York: Harper Collins, 2008), pp. 179-180.
- [3] Henry C. Plotkin. *Evolutionary Worlds Without End*. (New York: Oxford University Press, 2010), p. 1.
- [4] American Institute of Physics (AIP), Center for History of Physics, from Rutherford's Nuclear World. "Atop the Physics Wave: Rutherford Back in Cambridge, 1919-1937" . <http://www.aip.org/history/exhibits/rutherford/sections/atop-physics-wave.html>.
- [5] "Cockcroft's subatomic legacy: splitting the atom." *CERN Courier* (online). November 20, 2007. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/31864>.
- [6] "Ernest Lawrence's Cyclotron: Invention for the Ages." *Berkeley Lab Science Articles Archive* (online). <http://www2.lbl.gov/Science-Articles/archive/early-years.html>.
- [7] Edward Witten. "Matter matters." *The New Republic*. December 29, 1997, p. 16.
- [8] Steven Weinberg. *Dreams of a Final Theory*. (New York, Vintage Books, 1992), p. 266.
- [9] Edward Witten. "After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?" Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [10] Frank Close. *The Infinity Puzzle*. (New York: Basic Books, 201), p. 314.
- [11] Arthur Fisher. "A Different Kind of Gravity." *Mosaic*. 17 (Winter 1986/7), p. 20.
- [12] Marcia Bartusiak. "Science and Technology: Who Ordered the Muon?" *New York Times* (online). September 27, 1987. <http://www.nytimes.com/1987/09/27/books/science-technology-who-ordered-the-muon.html>.

- [13] Lynn Yarris. "The Golden Anniversary of the Antiproton." *Berkeley Lab Science Articles Archive* (online). <http://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/sabl/2005/October/01-antiproton.html>.
- [14] T. D. Lee and C. N. Yang. "Question of Parity Conservation in Weak Interactions." *Physical Review*. 104 (October 1, 1956), pp. 254-258.
- [15] "C S Wu—First Lady of physics research." *CERN Courier* (online). November 27, 2012. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/51556>.
- [16] William Dicke. "Chien-Shiung Wu, 84, Dies; Top Experimental Physicist." *New York Times* (online). February 18, 1997. <http://www.nytimes.com/1997/02/18/us/chien-shiung-wu-84-dies-top-experimental-physicist.html>.
- [17] Michael Peskin, SLAC (e-mail communication with the author), May 25, 2015.
- [18] William Dicke. "Chien-Shiung Wu, 84, Dies; Top Experimental Physicist." *New York Times* (online). February 18, 1997. <http://www.nytimes.com/1997/02/18/us/chien-shiung-wu-84-dies-top-experimental-physicist.html>.
- [19] Luis W. Alvarez. "Recent Developments in Particle Physics." *Science*. 165 (September 12, 1969), pp. 1071-1091.
- [20] Michael Creutz. "Yang-Mills Fields and the Lattice." *50 Years of Yang-Mills Theory*. Edited by Gerard 't Hooft. (Singapore: World Scientific, 2005), p. 359.
- [21] Gloria Lubkin. "Friedman, Kendall, and Taylor Win Nobel Prize for First Quark Evidence." *Physics Today*. January 1991, p. 18.
- [22] *Ibid.*, p. 19.
- [23] Elizabeth Kolbert. "Crash Course." *The New Yorker*, Annals of Science (online). May 14, 2007. <http://www.newyorker.com/magazine/2007/05/14/crash-course>.

- [24] Charles Pierce. "Samuel Ting's space odyssey." *Boston Globe Magazine*. April 10, 2011. http://www.boston.com/lifestyle/articles/2011/04/10/mit_physicist_samuel_tings_space_odyssey/.
- [25] Suzanne Jacobs. "The Revolution That Shook Particle Physics." *MIT Technology Review* (online). October 21, 2014. <http://www.technologyreview.com/article/531396/the-revolution-that-shook-particle-physics/>.
- [26] "Nobel Voices Video History Project, 2000-2001." Samuel Ting, Archives Center, National Museum of American History. June 29, 2000.
- [27] Carlos I. Calle. "The Universe—Order Without Design." (Amherst, New York: Prometheus Books, 2009), p. 114.
- [28] Charles Pierce. "Samuel Ting's space odyssey." *Boston Globe Magazine*. April 10, 2011. http://www.boston.com/lifestyle/articles/2011/04/10/mit_physicist_samuel_tings_space_odyssey/.
- [29] Martin L. Perl. "The Discovery of the Tau Lepton." SLAC-PUB-5937, September 1992.
- [30] John Ellis. "Those were the days: discovering the gluon." *CERN Courier* (online). July 15, 2009. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/39747>.
- [31] Michael Albrow. "Particle physics has a big future." *New Scientist*. April 12, 1979, p. 100.
- [32] Ilka Flegel and Paul Söding. "Twenty-five years of GLUONS." *CERN Courier* (online). November 12, 2004. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/29201>.
- John Ellis. "Those were the days: discovering the gluon." *CERN Courier* (online). July 15, 2009. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/39747>.
- [33] Frank Wilczek. "QCD Made Simple." *Physics Today*. August 2000, p. 22.
- [34] Frank Close. *The Infinity Puzzle*. (New York: Basic Books, 2011), pp. 80-91.
- [35] Steven Weinberg. "The Making of the Standard Model." *Arxiv.org*. January 3, 2004. <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0401010>.

- [36] Ibid.
- [37] Norbert Straumann. “Wolfgang Pauli and Modern Physics.” October 14, 2008. <http://arxiv.org/pdf/0810.2213v1.pdf>.
- [38] “The Nobel path to a unified electroweak theory.” *CERN Courier* (online). December 7, 2009. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/41013>.
- [39] “The Power of the Weak Force.” *CERN Press Office* (online). September 2, 2003. <https://cern-discoveries.web.cern.ch/cern-discoveries/Story/WelcomeStory.html>.
- [40] Peter Renton. “The W boson weighs in.” *Physics World*. January 2003, pp. 29-34.
- [41] Gordon Kane. “The Dawn of Physics Beyond the Standard Model.” *Scientific American*. June 2003, p. 70.
- [42] Gerard 't Hooft. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [43] Ann Finkbeiner. “Looking for Neutrinos, Nature’s Ghost Particles.” *Smithsonian Magazine* (online). November 2010. <http://www.smithsonianmag.com/science-nature/looking-for-neutrinos-natures-ghost-particles-64200742/?all>.
- [44] “This Month in Physics History. July 21, 2000: Fermilab announces first direct evidence for tau neutrino.” *APS News* (online) 20, July 2011. <http://www.aps.org/publications/apsnews/201107/physicshistory.cfm>.
- [45] Dan Hooper. *Nature’s Blueprint*. (New York: Harper Collins, 2008), pp. 125-126.
- [46] Matt Strassler. “The Higgs FAQ 2.0.” *Of Particular Significance* (blog). October 12, 2012. <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/the-higgs-particle/the-higgs-faq-2-0/>.
- [47] Gloria Lubkin. “Friedman, Kendall, and Taylor Win Nobel Prize for First Quark Evidence.” *Physics Today*. January 1991, p. 20.

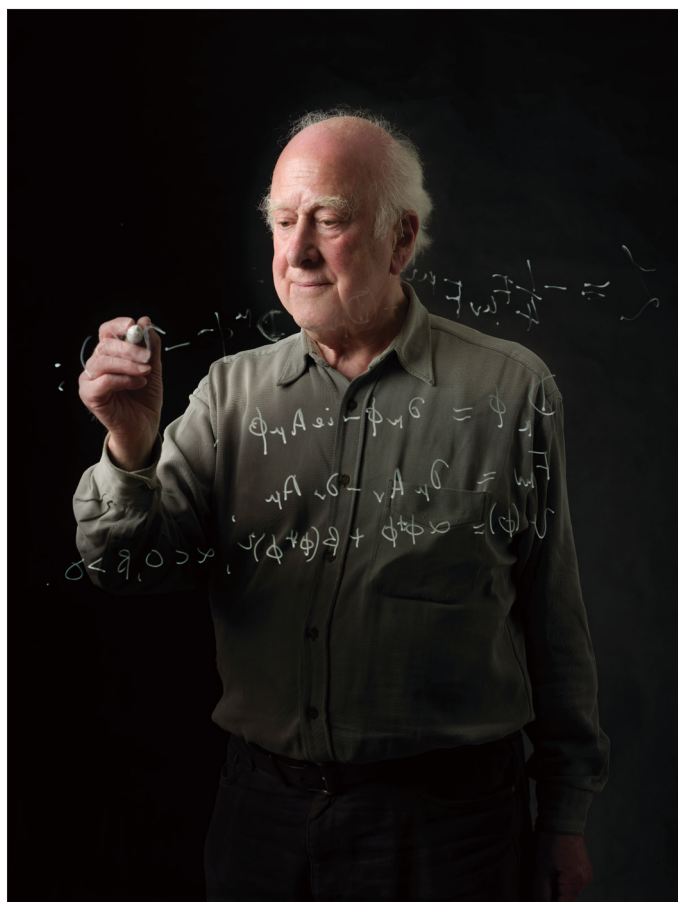
第 2 章

追踪希格斯

希格斯机制与质量起源

上一章讲述的故事止于 21 世纪来临之际。此时，标准模型的所有粒子皆已被发现——只有一个例外：希格斯玻色子。希格斯玻色子是整个理论的枢纽，诺贝尔奖得主杰拉德·埃图夫特更称之为“最后的要素”^[1]，所以它的缺席尤为引人注目。某种意义上，它可谓所有要素中最重要者——若以 J. J. 汤姆森的葡萄干布丁模型为喻，希格斯玻色子并不是葡萄干，而是制作布丁所用的面糊，它使布丁凝固成形。根据彼得·希格斯（Peter Higgs）等物理学家在 20 世纪 60 年代早期所发展的理论，希格斯粒子对应于一种场，它以某种能量形式弥漫于空间的每个角落，那些看似空无一物的区域亦然。

包括电子在内的多数已知基本粒子在希格斯场中穿行，与该场不停地相互作用，从而获得质量。这种质量使原子、分子得以形成，行星、恒星得以出现。若非希格斯场给予基本粒子以质量，这些粒子将以光速横冲直撞，相互之间几无关联，也无法构成我们熟悉的物质，所谓自然界的基本结构单元亦无从谈起。宇宙将因此面目全非，更没有人会为它设计复杂的理论。当然，能量与粒子仍会充盈其间，但它们无法形成寻常的物质，也不会有化学与生物学。这将是一个言说之人与被言之物悉数缺席的宇宙。



物理学家彼得·希格斯，2013年诺贝尔物理学奖获得者之一，摄于2008年（照片由CERN提供）

当然，如今的宇宙并非这等不毛之地，而出现于1964年的一种理论解释了个中缘由。这种理论解答了为何某些粒子具有质量，而包括光子在内的另一些粒子却没有质量。在菲利普·安德森（Philip Anderson）、南部阳一郎（Yoichiro Nambu）和杰弗里·戈德斯通（Jeffrey Goldstone）早期工作的基础上，6位物理学家在1964年的3个月内先后发表了论文，提出了一种神奇的场，如同糖浆一般充满宇宙。无质量的粒子感受不到这种糖浆，它们穿行其间、毫无挂碍。但是有质量的粒子在这种看不见的介质中运动时，就会感受到一种阻力。这种对运动的阻碍就是惯性，它与质量密切相关：物体的质量越大，就越难改变其运动状态，越难使之加速。粒子在希格斯场中获得多少质量，取决于它与该场的相互作用有多强。作用弱的粒子在其间身轻如燕，

获得的质量就小；反之，作用强的粒子深陷希格斯场的泥沼，获得的质量就大。

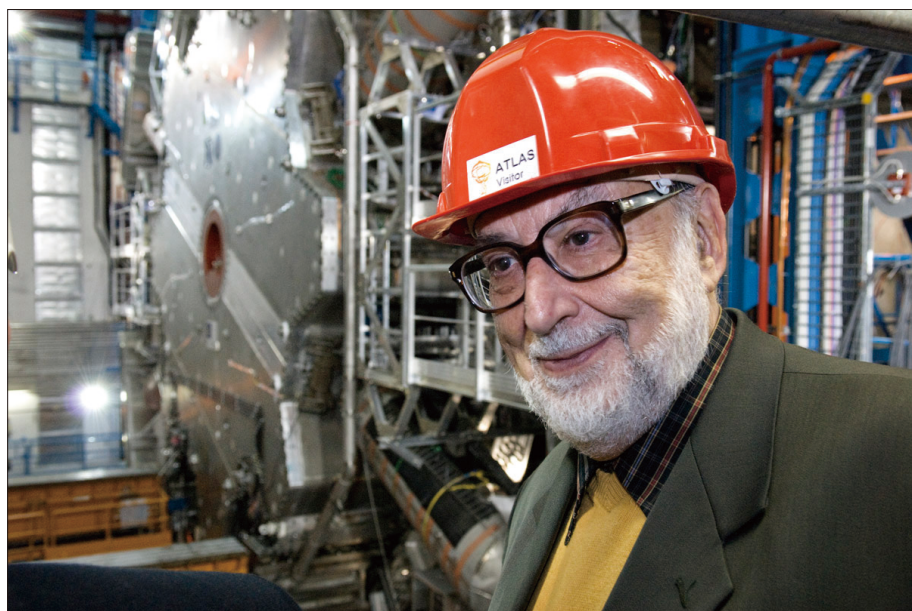
上面这种说法固然过于简化，而且它给人一种印象，仿佛粒子在穿越空间时会损失能量，就像炮弹落入一大桶糖浆那样。但是物理学家实际描绘的图像并非如此。粒子与希格斯场相互作用时并不会损失动能，但这种连珠炮似的相互作用的确会使粒子减速。实际上，希格斯场不停地拍打这些粒子，使它们无法以光速穿行其间。而根据狭义相对论我们知道，无法以光速运动的粒子必然携带质量。

因而从某种意义上说，希格斯场仿佛在全空间摆满了路障和减速带，它限制了粒子的运动，凝聚了粒子的能量。而能量集中于空间中的一小块区域，正是粒子质量的诸多物理表现之一。

根据哈佛的物理学家马特·斯特拉斯勒（Matt Strassler）所述，我们还能这样理解：“希格斯场改变了整个宇宙的环境，粒子与希格斯场直接作用后，它们的性质就会发生变化，与之前不再相同。”^[2]

数十年前，伦敦大学学院的物理学家戴维·米勒（David Miller）为了向一位主管科学的英国官员解释希格斯机制，^[3]曾做出如下类比：在一场鸡尾酒晚宴中，客人们均匀地落座于一室。无质量的光子在希格斯场中穿行，有如一位衣着得体的陌生人快速穿过房间，毫不引人注目，也不会与旁人交谈。而一位引人注目的名人，无论她是影星、歌星还是政坛新星，想要穿过房间到达某处（比如吧台或点心架）都会难上加难。不过即使她走得更为缓慢而困难，由于许多人在她周围亦步亦趋，她的步伐仍然携带着很大的动量，亦即很大的有效质量。这样一来，她想要停下脚步就会很困难，而当她停下来去签名、作答或是拍照时，周围的一大群人又很难让她再次走动。这位与旁人接洽不止的明星，就好像一个很重的粒子，比如顶夸克。这类粒子与希格斯场有很强的相互作用，因而为了移动起来，就需要花费更大的力气。^[4]

弗朗索瓦·恩格勒 (François Englert) 与罗伯特·布劳特 (Robert Brout) 于 1964 年 8 月发表了关于这种假想场的首篇论文。同年 9 月, 彼得·希格斯独自以同一主题先后发表了两篇文章。紧接着, 杰拉德·顾劳尼克 (Gerald Guralnik)、卡尔·哈根 (Carl Hagen) 与托马斯·基波 (Thomas Kibble) 在 11 月就该问题联名发表了论文。南部阳一郎是希格斯第二篇论文的审稿人, 他鼓励作者就其理论的物理含义多说一点。希格斯于是在论文中增加了一小节, 进一步解释说, 向这种后来以其名字命名的场中恰当地注入能量, 将会激发出一种新粒子, 就像疾风吹过 (或重物落入) 平静的海面, 会荡起涟漪一般。^[5]



弗朗索瓦·恩格勒, 2013 年的诺贝尔物理学奖获得者之一, 摄于 2007 年访问大型强子对撞机期间。(照片由 CERN 提供)

彼得·希格斯因首次强调了这种额外粒子的存在而巩固了其历史地位。这种新粒子, 连同其对应的场, 随后就以希格斯命名。希格斯提供了这种切实可寻的粒子, 为实验家树立了明确的目标。的确, 即使希格斯场提供了化解理论危机的机制, 但没有人说明如何探测它。应当探测的是希格斯玻色子, 它是希格斯场确凿无疑的显现。

以上就是布劳特、恩格勒、顾劳尼克、哈根、希格斯与基波所提出的策略。他们的动机来自构造标准模型时所浮现的悖论：标准模型要求存在一种对称性作为基础，而这种对称性又要求存在一种无质量的带电玻色子。就我们目前所知，自然界中并无此物。标准模型中的每种作用力，强、弱、电磁，以及统一的电弱力，都对应于一种重要而深刻的对称性，即规范对称性。这些规范对称性是杨-米尔斯理论的核心（见第1章相关讨论），也是标准模型的要害。如果没有规范对称性，理论将会做出荒谬的预测，诸如某事件发生的概率超过百分之百，这显然不可能。

蕴含规范对称性的系统、力、场可在不改变物理本质的前提下做各种变换，包括平移与旋转。而标准模型中的力还可做另一种变换：任意交换两个荷力粒子不会引起任何可察觉的改变。这的确是高度的对称性，因为一个荷力粒子可被另一个荷力粒子随意替换，而不产生任何可观测效应，替换之后一切如旧，这正是物理学家使用“对称”一词时所指的性质。这同时暗示，在足够高能、足够高温的环境里，电磁力与弱力合为一体，此时电弱力的荷力粒子，即光子与W、Z粒子，均无质量。但这很成问题：物理学家一直不相信存在无质量的带电粒子，这一概念与实验结果不符。1954年，沃尔夫冈·泡利曾就此向杨振宁发难（见第1章）。杨-米尔斯理论中美妙的数学被搁置了近10年，其中的问题才得以解决，理论重整旗鼓凯旋而归。

直接给W、Z粒子添加质量以调和杨-米尔斯理论与实验结果，这条路行不通，因为这会破坏弱作用原有的规范对称性。不过物理学家找到了另一条出路，那就是假设宇宙中的粒子最初的确没有质量，但是使基本粒子保持无质量的对称性转瞬即逝：在大爆炸之后大约千亿分之一秒（即 10^{-11} 秒，如第1章所述），电磁力与弱力分道扬镳，破坏了“质量的对称性”。大爆炸之后持续冷却的宇宙在此刻经历“相变”，如同水结冰的过程。

这类从高温状态到低温状态的变化,通常会降低对称性的程度。“虽然直观上你可能会觉得冰这样规整的东西更对称,事实却恰恰相反,”哥伦比亚大学的物理学家布莱恩·格林恩(Brian Greene)说,“越对称的东西,能在越多的变换下(比如旋转)保持不变。”由于特别的晶体结构,冰只在很少几类旋转变换下保持不变(例如沿给定转轴旋转特定的角度,比如60度)。与此相反,由于液态水分子的分布更随机,将液态水沿任何转轴旋转任何角度,其整体都不会有可察觉的变化。

当水沸腾成为气体时,会变得更为对称,这是因为气体分子较液体分子排列更错乱,因而气体系统在旋转变换后与其初态更接近。反之,气体的液化伴随着对称性的降低:用来想象宇宙在初始时刻发生的变化,这或许是最佳方式。希格斯场在宇宙的初始时刻不停涨落,其均值为零。而当宇宙膨胀并降温到“沸点”时,希格斯场凝聚成某种格林恩叫作“海洋”的东西,此时它携带有均匀但非零的值,填充在空间的所有角落中。^[6]

使电弱荷力粒子保持无质量的规范对称性,随着希格斯场的这种“液化”而发生自发破缺。自此以后,电磁力与弱力不再相同。虽然它们曾强度相当,但在此相变之后的低能环境下,弱作用力相对于电磁力就变得越来越弱。与此同时,这些力的荷力粒子,即光子与W、Z粒子,也不再完全相同。提出这个机制的布劳特、恩格勒、顾劳尼克、哈根、希格斯与基波,解释了这一切如何发生。他们的解答在本质上是说,电弱理论中规范对称的方程仍旧正确,只是宇宙与预想不同:它并不空。

此外,在汤川秀树(Hideki Yukawa)先驱性工作的基础上,斯蒂芬·温伯格等物理学家进一步认为,标准模型的其他基本粒子,包括夸克与带电的轻子(但不包括无质量的光子与胶子),亦与无处不在的希格斯场相互作用,其作用的强度各异,因而从中获得的质量也各异。在理论家跨出这一步之前,他们曾遇到一个难题:当W、Z被赋予相

同的质量时，控制弱核力的方程会给出错误的预言。（该问题与所谓的“W-W 散射”有关，详见第5章）。然而，引入对称性破缺的机制后，描写弱作用与电弱作用的方程就能同时描写无质量的荷力粒子（如光子）与有质量的荷力粒子（如 W、Z 粒子），且为实验所证实。

在此过程中，自然律内在的对称性并没有消失。它作为一种基本的结构仍旧存在，而且可被完全恢复，恢复的方法就是将宇宙加热从而使希格斯场“蒸发”。不过由于温度与其他因素，宇宙的实际状态已将这种对称性遮盖起来，隐匿不可见。

比方说，当圆绕圆心运动或球绕球心运动时，看上去没有什么变化。此时，空间的所有方向都是等价的，没有哪个方向更为特殊，这就是旋转对称性。但在某些情况下，旋转对称性就很不明显。这时，系统会随意选出一个特殊方向——并不是由逻辑做出的选择，而只是随机的行为。“设想一支直立的铅笔，它一跌倒就选出了一个特别的方向，”哈佛的物理学家丽莎·兰道（Lisa Randall）说，“当铅笔直立时，铅笔周围的所有方向都相同，而一旦它跌倒，对称性就破缺了。”这不难理解，因为铅笔不可能同时朝所有方向跌落，它必须朝一个方向跌去。“于是，直立的铅笔所具有的旋转对称性，就被平躺的铅笔自发地破缺了。”与此类似，她继续说：“希格斯场以一种不对称的方式弥漫在宇宙中，使弱力的对称性自发破缺。”^[7] 这种机制的最终结果是，宇宙中原本没有质量的粒子因之获得了质量。

希格斯场究竟将质量给了哪些粒子？根据标准模型，W、Z 粒子的质量就来自它们与希格斯场的作用。这并不意外，因为提出恩格勒－布劳特－希格斯－顾劳尼克－哈根－基波机制的动机之一就是为这两种粒子提供质量。此外，所有带电的轻子（电子、 μ 子和 τ 子）也从希格斯场获得质量，而光子与胶子这类无质量粒子与希格斯场没有相互作用。（至于那些最轻的电中性轻子，也就是中微子，是否从希格斯

场获得质量，目前尚无定论且众说纷纭。由于中微子极轻，物理学家还没有彻底弄清它们的起源，第4章将继续讨论这个问题。）

费米实验室主任奈哲尔·洛基耶（Nigel Lockyer）解释道：“我们说电子的质量来自它与希格斯场的相互作用，这可以设想为，希格斯场将一个左旋电子迅速变为右旋电子，反之亦然。”所谓左旋的电子是指其自旋方向与运动方向（即动量方向）相反。反之，右旋电子的自旋与运动方向相同。（这里的自旋方向由右手定则确定：让右手大拇指以外的4根手指沿粒子自转方向弯曲，规定此时大拇指伸直的方向为自旋方向。）洛基耶说：“这种快速的转换携带能量，而根据 $E=mc^2$ ，能量就是质量。”这种在左旋与右旋粒子间快速切换的机制，同样将质量赋予夸克、 μ 子及其他粒子。他继续说：“像顶夸克这样重一些的粒子，其来回转换的频率要比电子这样的轻粒子快得多。”而其能量，亦即质量，刚好正比于其转换的频率。^[8]

电子带有质量，这一事实非同小可。如果电子稍微轻一些，那么原子和分子就会更大且更不稳定。而若电子无质量，那么原子的尺寸就可以说是无限大，换言之，电子就不会被质子和中子所束缚而形成原子。而没有原子和分子，如今的世界，包括我们自己，都不会存在。

上文提及的夸克，同样通过与希格斯场相互作用而获得质量。由于质子与中子比电子重将近2000倍，而它们又是由夸克构成的，因而人们大概会以为寻常物质的质量大多来自夸克。然而事实并非如此。虽然希格斯场将质量赋予夸克和电子这类基本粒子，布莱恩·格林恩解释说：“当这些粒子结合成质子、中子、原子等复合粒子时，其质量还会接受其他贡献，对此我们已有很好的理解。”^[9]一个复合粒子的全部能量，包括其各组分的静质量，其运动的动能，以及这些组分间相互作用所产生的结合能。

这就解释了夸克质量为何只占质子质量的百分之一左右。^[10]实际上，夸克与胶子在核子中的运动近乎光速，而质子质量的大部分就来

自夸克与胶子的动能与强作用力的结合能。然而，质子不仅仅是3个“组分夸克”与胶子的简单集合，它的内部其实远为复杂混乱。质子内充满了所谓的“虚粒子”，包括虚胶子与夸克-反夸克的虚粒子对，它们不停地生灭于瞬息之间。这一现象是量子力学的标准观念——不确定性原理的直接结果。根据这种观念，微观粒子绝不停留在恒常不变的状态，与其对应的场亦如此。实际上，粒子与场持续不断地颤动、涨落，涨落产生的波纹会瞬间产生更多的所谓虚粒子。这些生灭不息的虚粒子，其涨落所对应的能量则会贡献到质子的总质量中。这一情形同样适用于中子。

因而，普林斯顿高等研究院的胡安·马尔德西纳（Juan Maldacena）解释说，即使“希格斯给予多数基本粒子以质量，我们周遭物质的大部分质量并不来自希格斯场。”实际上，它们主要来自质子与中子的质量。^[11]

正因如此，杰拉德·埃图夫特等很多物理学家并不同意将希格斯玻色子称为“上帝粒子”。埃图夫特申明：“我们并不相信某个上帝粒子，我们所相信的是系统的数学与物理，以及我们试图发现的自然定律。”^[12]

那么，这种“系统的物理”怎样才能成功发现希格斯玻色子呢？尽管希格斯玻色子在理论上至关重要，但在近半个世纪中它却只是一个假想的实体。物理学家一直认为，发现希格斯玻色子的最佳方式是，使两个近乎光速而反向飞行的质子（或一对质子与反质子）对撞。“我们所做的一切，不过是在充满宇宙的希格斯场中搅起一点涟漪，”理论物理学家尼玛·阿卡尼-哈梅德解释说，“多数情况下它就像平静的湖面，什么都没有发生。然而你只要撞得足够狠，就有可能在这湖面上挑起一丝波纹。你所能制造的与量子力学相容的最小波纹，就叫希格斯玻色子。”^[13]

不过，我们不可将这充满希格斯粒子的湖（或者回到刚才的比喻——“海洋”）想象成如同水分子充满海洋一般。事实上，无所不

在的希格斯场（或曰希格斯海）通常并不包含希格斯粒子，除非用粒子对撞或其他方式，对它精确地输入能量从而在其表面产生波纹。在量子理论中，任何基本粒子都可被看作相应的量子场的波纹。所以，希格斯场的波纹就对应于希格斯玻色子。然而这种粒子非常短命，仅存留 10^{-21} 秒就消失不见，此后海面又归于平静。

搜寻希格斯的历程

实验家所面临的关键挑战，正是建造一台足以在希格斯海上掀起涟漪的强大加速器，并通过它释放出希格斯玻色子。物理学家原指望费米实验室的 Tevatron 发现希格斯玻色子，因为它曾是 20 多年来世界上最强大的粒子加速器。费米实验室原主任、物理学家罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）就曾以寻找希格斯为由呼吁建造一系列加速器，包括后来的 Tevatron。1969 年动工之前在国会召开的听证会上，当罗德岛州参议员约翰·帕斯托（John Pastore）问到加速器如何可能提升国家安全时，威尔逊坚称，新加速器“不能直接保卫我们的国家，但会使它更值得保卫。”^[14]



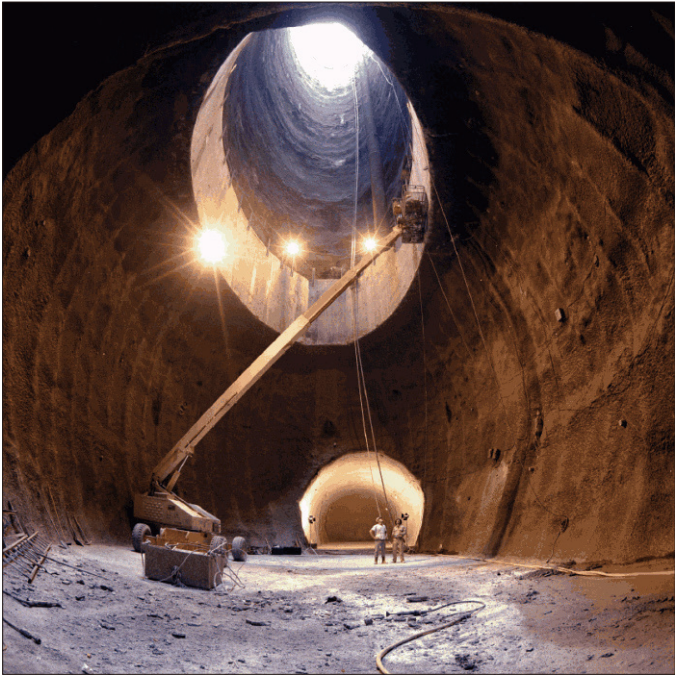
罗伯特·威尔逊，费米国家加速器实验室首任主任，摄于 1969 年一台机器的奠基仪式上。这台机器经过一系列扩建与升级，最终成为 Tevatron 对撞机。（照片由费米实验室提供）

1983—2011 年运行期间，物理学家在 Tevatron 上发现了顶夸克、 τ 中微子、5 种包含底夸克的“B 重子”、包含一个底夸克与一个粲夸克的 B_c 介子，以及其他粒子。在这累累硕果中，只有希格斯玻色子仍无踪影。Tevatron 显然已经撞出了希格斯粒子，只是其数量还不足以使物理学家确信其存在。费米实验室的研究者已经发现了明显迹象，表明存在一个质量在 115~135GeV 的粒子。然而这种迹象只达到了“ 3σ ”的统计显著度。也就是说，此发现纯粹出于巧合的概率约为 1/550。^[15] 虽然这一结果令人振奋，但是物理学的新发现必须满足更高的标准，即“ 5σ ”。也就是说，该信号来自背景涨落造成的随机“噪声”的概率小于 1/3 500 000。换言之，我们的目标是找到确实来自希格斯粒子的新信号，而不是来自熟知的标准模型粒子的信号。Tevatron 大大缩小了物理学家寻找希格斯粒子的能量范围，它只是不能在足够高的能量产生足够高效的对撞，从而未能跨过发现新粒子的门槛。

计划在德克萨斯州达拉斯修建的超导超级对撞机（SSC）将能使质子沿 87 千米（54 英里）长的椭圆形隧道运行，其对撞能量高达 40TeV，是 Tevatron 的 20 倍。人们感到这样高的能量足以保证希格斯粒子的发现。1982 年人们开始计划这一庞大的项目，白宫与参议院联合委员会于 7 年后拨款，1991 年开始建设。然而，SSC 项目一直受困于官僚的繁文缛节、超支的费用、对运营的持续质疑，以及多变的政治环境（包括 1993 年新就任的总统）。

罗伯特·威尔逊 20 年前为粒子物理基础研究所做的雄辩，在 20 世纪 90 年代初已经作用甚微。1992 年 6 月，众议院投票决定停止资助 SSC，不过两个月后参议院决定恢复资助。1993 年 10 月，国会再次逆转局势，在该项目已经花掉 20 亿美元的情况下将其取消。^[16] 此时，德克萨斯州中部与东南部的白垩地层（包含石灰岩、砂岩与页岩）中已挖出了 24 千米（15 英里）的隧道。^[17] “我们历经艰难才争取到 3 个部门的支持，走到如今这一步，已经完成了 20%,” 诺贝尔奖得主里昂·莱

德曼发泄着他与同事们的失望，“然后国会以其无限的智慧说：‘哎呦，不。’”^[18]



超导超级对撞机（SSC），按照规划为修建在德克萨斯州达拉斯长达 87 千米的粒子加速器，该项目在完成约 20% 后被美国国会于 1993 年取消。（照片由美国能源部提供）

纽约的前共和党议员舍伍德·波勒特（Sherwood Boehlert）表达了一种物理学家必然起而攻之的观念：“我很难相信会有人认为，对宇宙起源缺乏足够的认识，是这个国家最紧迫的议题之一。”^[19] 诸如此类的观点横行于世，成为了导致 SSC 项目取消的重要因素。美国高能物理学界由于这个决定的打击，至今仍未恢复（或许永远也不能恢复了）。

万幸的是，一个预备项目开始运作，尽管是在大西洋彼岸。CERN 的大型电子－正电子对撞机是当时同类设备中之最大者，它于 1989 年开机并全力运行。这台占用 27 千米隧道的加速器始建于 1983 年，而在此前数年，就已决定利用该隧道放置一台质子对撞机。这台机器，即大型强子对撞机（LHC），“几近难产”，英国物理学家林顿·伊文斯（Lyndon Evans）这样说。他当时负责该对撞机项目的实施。“1987 年 SSC 的批

准使整个项目遭到彻底的质疑。SSC 的质心系能量可达 40TeV ，几乎是 CERN 所能建造的机器的 3 倍。”伊文斯继续说，这一项目最后的一线生机来自“卡洛·鲁比亚的应变与坚持。”^[20]



物理学家卡洛·鲁比亚在 CERN 的办公室中。（照片由 CERN 提供）

鲁比亚全力推动 LHC 项目时，欧洲正面临其自身的财政困难。他的坚持不懈终获成功，这也是整个高能物理学界的幸事。1993 年 SSC 项目被取消，因而 15 年后 Tevatron 逐渐停机之时，物理学家需要找到下一个去处——这次是日内瓦。

LEP 于 2000 年停机，以便为 LHC 让路。2008 年夏天，LHC 建造完毕，耗资在当时约合 80 亿美元。^[21]同年 9 月 10 日，人们为 LHC 上第一束粒子的运行举行庆祝。然而仅仅 9 天后，LHC 的物理学家就遭遇挫折：电力失常导致隧道内液氮泄漏。人们关闭了机器，并历时一年多才将问题解决，其间移除、修复并重新安装了隧道中分布范围长达 3 千米的 53 块磁铁。^[22]2009 年 11 月，科学家与工程师重新开启了束流运行，而直到 2010 年 3 月实现第一次质子对撞后，该加速器才又回到正轨。



Tevatron 粒子加速器夜景，其长度超过 6 千米，于 2011 年停止运行。（照片由费米实验室提供）

当一台机器达到这种规模与技术复杂度时，一定程度的延误就在所难免。“LHC 是有史以来最复杂的科学仪器”，伊文斯说。他目睹了该机器从建造到完工的全过程。^[23]

这台繁复而新奇的机器大概远远超出了卢布·哥德堡（Rube Goldberg）¹ 的想象力。它的主要目标是，在横跨法国与瑞士边界的 27 千米跑道上，让两束质子流反向运行。在被加速到光速的 99.999999% 后，这些质子及其包含的夸克与胶子将发生相互碰撞，在其猛烈撞击的瞬间，人们试图重现宇宙大爆炸后远小于一秒内的物理环境。

数以千计形态与尺寸各异的超导磁铁，引导着粒子流运行在加速器的环形轨道上。这些磁铁被冷却到 -271.3 摄氏度，比外太空的温度还低，仅比绝对零度高 2 摄氏度，以消除电阻和能耗。LHC 利用了有史以来性能最为强大的磁铁，其磁场比地磁场强约 10 万倍。磁铁使质

1 卢布·哥德堡（1883—1970），美国漫画家，以设计并绘制各种复杂而滑稽的机械知名。——译者注

子等带电粒子偏离直线路径。质子运行得越快，就越难将其限制在固定的弯曲轨道上。总体上，LHC 机器最大的部分就是这些最为强大的磁铁，它们保证了 LHC 能将最快的粒子束弯折，从而达到最高的能量。^[24]

该机器在首轮运行的满负荷状态下，能产生高达 8TeV 的质心系能量，其碰撞率高达每秒钟 10 亿次左右。^[25] 质子束在 27 千米轨道上的 4 个站点交叉并发生碰撞，每一站点都设有探测器以监视这些大碰撞。其中，ALICE 与 LHCb 两个探测器没有参与寻找希格斯。当加速器以“强子模式”运行时，ALICE 将研究铅核及其他原子核的对撞（这也是该机器被称为“大型强子对撞机”而非“大型质子对撞机”的原因）。而 LHCb 则集中关注底夸克的衰变。

建造 LHC，大体上是为了在 7 倍于前所能及的温度与能量下研究物质世界。然而 LHC 上另两个巨型探测器 ATLAS 与 CMS 则有更为明确的设计目标，根据丽莎·兰道的评论，这一目标即“找到 [希格斯] 粒子，或者证明它不存在，或揭示出更复杂而微妙的模型。”^[26] 也就是说，人们不只希望找到粒子，同时希望通过研究这些粒子更好地理解希格斯场及其物理机制。

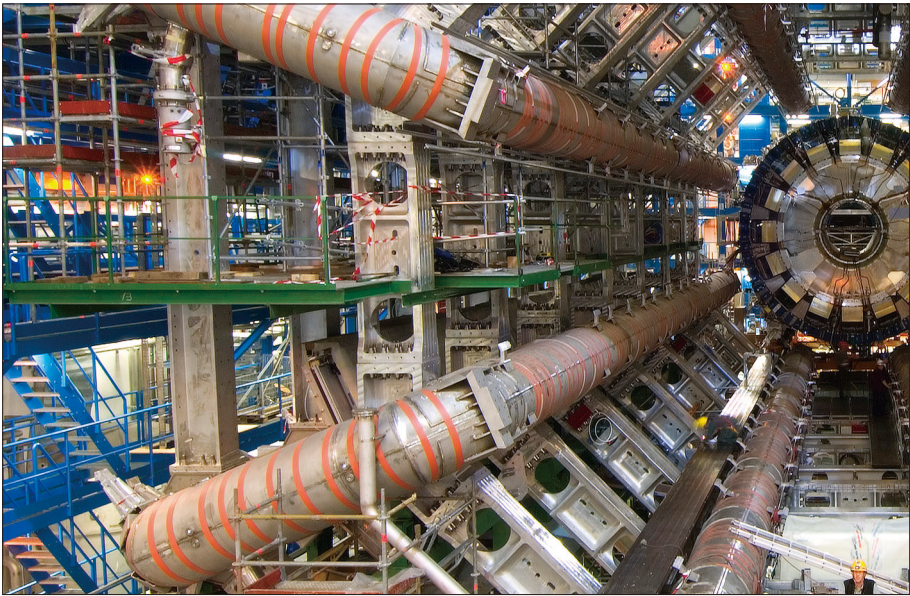
ATLAS 与 CMS 位于 LHC 隧道上相对的两端。为了交叉检验，它们使用各自独立的设计以分析质子对撞的结果。ATLAS 是“一个轮形 LHC 设备 (A Toroidal LHC Apparatus)”的缩写。该研究团队的物理学家莫妮卡·唐福德 (Monica Dunford) 将它描述成“完全订制、手工焊接、充满微电子设备的 5 个部分，就像一块 [巨型] 瑞士表”。^[27] 该研究组包括 3000 多位物理学家。虽然 ATLAS 与 CMS (“紧凑 μ 子线圈 (Compact Muon Solenoid)”) 的缩写) 使用了不尽相同的技术，但仍有几个共同特征。

两台探测器都包含 4 个主要部分：首先是内层探测器，或称“追踪器”，它可以收集高速带电粒子的电信号，精确地绘制出这些带电粒子的轨迹，并测量其动量。其中部分任务由硅探测器承担，这是在硅制微芯片上印刷的微观线路，它能够记录离子的出现。其次是追踪

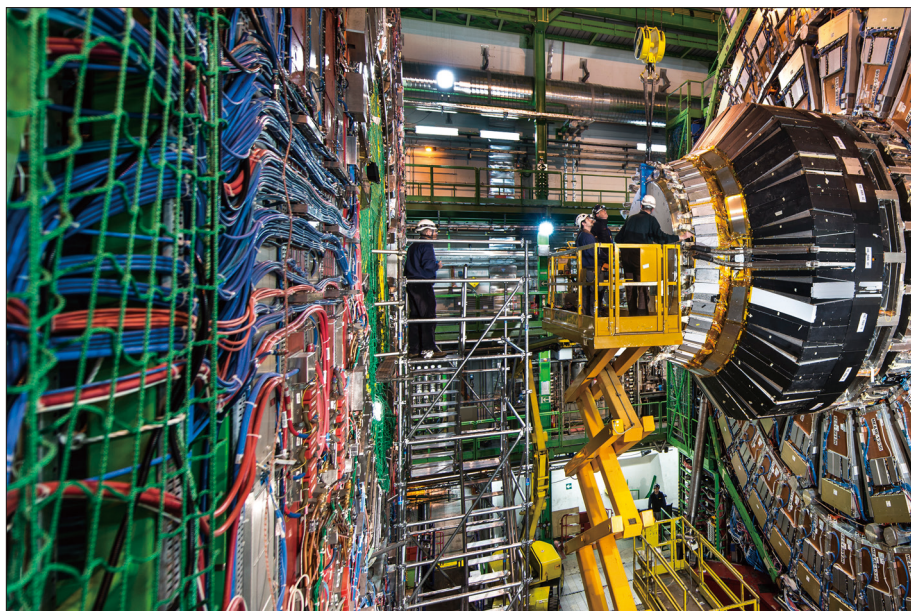
器外层的谱仪，它能够辨认出 μ 子并测量其动量。第 3 种关键部件是量能器，它一般利用光传感器来测量粒子携带的能量。最后但同样重要的是磁铁系统。它们并不直接探测粒子，但能使带电粒子沿曲线运动，从而帮助测量动量：带电粒子的轨迹在磁场中弯曲的方向会告诉我们它带正电还是负电。而其弯曲的程度则取决于粒子的质量：粒子越轻则轨迹的偏转越厉害。

巨型探测器 ATLAS，人称“外星飞船”^[28]，长约 45 米，高 25 米有余，其体积约为巴黎圣母院的一半。它重约 7000 吨，相当于一座埃菲尔铁塔或者一百架波音 747 飞机。^[29]

CMS 略小于 ATLAS，其体积与普通教堂相当，然而却比 ATLAS 重一倍。它使用了 12000 吨铁，同时配备了最为强大的磁铁。^[30] 它的研究团队也大于 ATLAS，包括了大约 4000 名物理学家。



位于 CERN 的大型强子对撞机的 ATLAS 探测器（照片由 CERN 提供）



位于 CERN 的大型强子对撞机的 CMS 探测器（照片由 CERN 提供）

探寻难以捉摸的希格斯，征途漫漫，旷日持久，其所需的技术手段亦同样非同寻常，无怪乎 CERN 曾将这种努力，连同整个粒子物理的征途，形容为“不可思议地追逐难以想象之物。”^[31]

这场“不可思议的追逐”，其终极目标就是希格斯玻色子。它极端不稳定，存留时间不到 10^{-21} ，比光穿过一个原子的距离所需的时间还短。^[32] 由于这一粒子极端短暂的寿命，研究者无法指望看到希格斯本身。幸而，通过识别希格斯衰变产生的轻粒子，以及这些轻粒子进一步衰变出的更轻粒子，研究人员能够获得希格斯存在的信号。为此，物理学家试图测量质子对撞所产生的全部粒子的能量与动量，同时分析其轨迹，以确定衰变出这些粒子的母体粒子的质量及其他性质。

到目前为止，LHC 产生希格斯玻色子最有效的途径是让两个胶子对撞。与此同时，希格斯玻色子随后的衰变有多种不同的途径或称“衰变道”，其中一些比另一些发生得更频繁。例如，希格斯粒子可以衰变成两个高能光子（即所谓的 γ 射线），还能衰变成一个底夸克及其反夸克，或者一个 τ 轻子及其反粒子，或者一个 W 粒子及其反粒子，或

者两个 Z 粒子。而两个 Z 粒子随后又可以衰变成 4 个带电轻子，包括电子、正电子、 μ 子与反 μ 子。希格斯最大的衰变道是产生底夸克及其反夸克，但是这类事件不易被研究者观察到，因为底夸克及其反夸克不仅可以来自希格斯的衰变，还可能来自普通粒子的衰变，而且这种可能性较前者高百万倍。^[33] 加之希格斯粒子衰变得如此之快，无法直接观测，这就成为实验家们所面临的巨大挑战。“绝大多数情况下希格斯衰变出的东西难以辨认，因为你在寻找的新东西会被你所熟知的背景淹没，” 马特·斯特拉斯勒解释说，^[34] 寻找希格斯粒子，“在某种程度上就好像在白天试图看见一颗遥远的恒星；你在一片非常明亮的背景中寻找一个非常微弱的信号。”^[35]

对此，一种策略是寻找别的信号，这种信号比上面提到的第一种还要暗，但是其背景要暗得多——就像在夜空中找一颗极暗的星星，而不是在白天找亮一些的星星。LHC 采用这种策略取得了成功。其中到目前为止，最富成效的方法是寻找希格斯粒子衰变出的两个光子。对于每个产生的希格斯粒子，该过程发生的概率仅为 0.2%，但是这种衰变相当独特，所以更易被归因于希格斯粒子。^[36]

此外需要强调的是，在 LHC 上每一万亿次质子对撞才能产生一个希格斯粒子——由此数字可一窥实验家们所面临的巨大挑战。他们不仅需要挑出那些极其罕见的事例，同时必须避免陷入洪水一般的海量数据中。LHC 上的质子对撞每秒钟大约发生十亿次，其中可能有价值的数据被储存下来，约占千分之一；其余事例即刻被丢弃，以防数据过载。^[37]

因而，对信号做初步分析时，就需要从理论上弄清一般的信号背景是什么样的。换言之，即对给定的事件（如双光子事件），分析除了希格斯外还有哪些可能的来源。这样一来，某给定事件的事例数显著超出预期，就有可能提供希格斯存在的证据——这样的事件越多，证据越强。而数据点在某特定能量处积累出尖峰，就指示在该能量或

等效的质量处存在一粒子。需要警惕的是，物理学家必须使自己（和他人）确信他们实际见到的正是新粒子的信号，而不是随机涨落的假象。为此他们必须探测到足够多的事例数。

LHC 研究者们亦遵循这一基本步骤。他们尽可能多地收集并分析双光子事例，计算每次产生的两个光子的总能量。由于各类随机的过程可以产生双光子，人们预期这些事件在不同的能量区域的分布相当光滑。然而实验家们倾向于寻找该分布在某一特定能量处是否出现特殊的隆起或超出，因为这有可能对应于希格斯粒子的质量。对于四轻子事件，他们也做相同的分析，因为这类事件的信号也相当独特。“如果你在这两种事件的分布图上同时看到了隆起，而且隆起出现在相同的能量处，那么你就获得了一种新粒子的证据，这种粒子既可衰变成 2 个光子，又可衰变成 4 个轻子，”斯特拉斯勒解释说。^[38]

发现神秘的希格斯粒子

到 2012 年 6 月末，ATLAS 和 CMS 团队的成员确信他们已经积累了足够的证据，足以切实证明希格斯的存在。CERN 为此举行的公开发布会安排在 7 月 4 日，不是因为美国独立日，而是因为澳大利亚墨尔本在当日召开国际高能物理大会。人们在 CERN 的发布会前已有预感。数以百计的物理学家提前几小时就开始等待，有些甚至在主会场外过夜，以期得到座位目睹这一重大事件。更有成千上万的人们通过因特网直播观看了这场盛会。

CERN 总干事罗夫·霍伊尔（Rolf Heuer）向听众致意，向他们保证由 CMS 和 ATLAS 发布的报告将会使这一天成为“特殊的日子”。^[39]首先报告的是 CMS 发言人约瑟夫·因坎德拉。他向该合作组的 4000 多名成员致谢后，便快速进入主题，展示了双光子事件及四轻子事件的数据在大约 125 GeV 处所呈现的尖峰。对这两类衰变道的联合分析有 0.6 GeV 的不确定度，其总体统计显著度达到 5σ 。^[40]因坎德拉说，CMS 团队积

累的证据足以令人信服地证实这种“最罕见的粒子之一，也就是我们称为希格斯的粒子”。^[41]



物理学家罗夫·霍伊尔，CERN 总干事，在 2012 年 7 月 4 日的发布会上宣布了据信是希格斯玻色子的发现。（照片由 CERN 提供）



物理学家约瑟夫·因坎德拉，CMS 合作组前发言人，在 CMS 控制室监视实验结果。（照片由 CERN 提供）

ATLAS 发言人法比奥拉·查诺蒂 (Fabiola Gianotti) 随后登台, 讲述她的团队在 126GeV 附近探测到的尖峰。她说, 将双光子事件与四轻子事件的数据做“重要结合”后, ATLAS 合作组同样达到了新发现所要求的 5σ 的信号阈值。她幽默地向这一新粒子的质量致谢, 因为这一质量使得 LHC 能够观察和研究它。“标准模型玻色子具有这一质量非常好,” 她说, “多亏这个质量, 我们得以测量到它。谢谢你, 大自然。”^[42]



物理学家法比奥拉·查诺蒂站在 ATLAS 探测器旁边。她是 ATLAS 实验组前发言人, 也是 CERN 的下一任总干事。(照片由 CERN 提供)

两组独立的实验团队采用不同的设备分析了质子对撞的结果, 并得到了确切的证据。这使世界各地的物理学家确信, 一种希格斯粒子已经被发现, 其质量在 $125 \sim 126\text{GeV}$ 。现场掌声雷动, 欢呼四起。霍伊尔在一片喝彩中喊道: “我这个外行想要说, 我们找到了它!”^[43]

1964 年提出希格斯机制的理论家中, 恩格勒、顾劳尼克、哈根与希格斯 4 位来到会场并接受众人的起立鼓掌。从理论预言到实验发现历经 48 年, 庆典之前的这段漫长时间堪称粒子物理学史上最长的等待。^[44] 年届 83 岁的希格斯拿起麦克风, 向参与该实验的物理学家表达祝贺。“在我有生之年发生这一切, 对我来说实在难以置信,” 他说。

霍伊尔补充道：“不只是在你有生之年，这个实验的每一位过去的和现在的参与者都应当为这一天而自豪。尽情享受吧！”^[45]

霍伊尔所指的值得享受的事，就是这一集体性的胜利。LHC 的建设与研究，涉及百余个国家的上万名科学家和工程师。^[46] 费米实验室的理论家乔·利肯（Joe Lykken）就此评论道：“如果联合国能像 CERN 那样运转，世界就会更美好。”^[47]

发现这个粒子是极其困难的任务。因坎德拉说，它的成功完成树立了“全球合作的典范”。其中，来自巴勒斯坦与以色列、伊朗与伊拉克、印度与巴基斯坦的研究者并肩工作。“我们花了 20 多年为这台机器与探测器做准备。一开始，我们甚至连最终实验所需的技术都还没有。

“我们常被问，”因坎德拉补充道，“‘真的需要这么多物理学家来做一个实验吗？’而当你了解到我们都做了些什么之后，你就会惊讶，居然只有这么一些物理学家。”^[48]

数以千计的物理学家参与发现了希格斯粒子，但只有恩格勒与希格斯两位物理学家为此获得了 2013 年的诺贝尔奖。由于诺贝尔奖委员会的限制，该奖只颁发给不超过 3 位在世的科学家。恩格勒的合作者布劳特本应一同获奖，然而他已于 2011 年去世，恰好是 LHC 取得突破的前一年。

这一发现将物理学带入了新的纪元，并提出了许多有待解答的问题。这首先是因为希格斯玻色子不仅是一个新粒子，而且属于一个新的种类。爱德华·威滕说：“希格斯粒子之所以如此迷人，其部分原因就在于它是我们所知的唯一一个没有自旋的基本粒子。”^[49]

“在过去大约 60 年里，我们已经见到了一大堆粒子，但从未见过一个像希格斯一样的粒子，”阿卡尼-哈梅德补充道，“虽然几十年来我们一直预料希格斯会出现，但这并不能改变一个极为诡秘的事实，那就是它居然存在。”

自旋是一种角动量，是每种基本粒子都具有的从不改变的内禀属性。所有玻色子都具有整数自旋，而所有费米子都具有半整数自旋。从理论上讲，粒子的自旋只能是 0 、 $1/2$ 、 1 、 $3/2$ 与 2 。“这神奇地限制了自然界运作的方式，”阿卡尼-哈梅德评论道。此前发现的所有粒子，其自旋不是 $1/2$ 就是 1 。“而当希格斯被发现之后，”他说，“我们在这一个列表上新加了一种自旋：我们终于发现了一种自旋为 0 的基本粒子。”^[50] 这种粒子的自旋为 0 ，意味着它与我们熟知的其他粒子不同，它没有特别的旋转方向。它可被任意旋转，但不发生任何改变。

希格斯粒子所属的新粒子种类，不只具有前所未有的自旋，它与其他粒子间的相互作用也可被看作一种新的力。与标准模型中已知的强、弱、电磁力，以及万有引力不同，这种新力地位独特。如同其他相互作用，这种“希格斯力”亦由荷力粒子传递，即希格斯玻色子。但与所有其他力不同，这种力并不基于规范对称性。作为一种已被确证存在的现象，希格斯力是研究者们急切希望研究的课题。然而想要更完整地探测它，就需要能量更高的机器。

“你通常会觉得，当你发现了什么，故事就结束了，”因坎德拉说。“而我从科学中学到的是，这几乎总意味着新的开始。”^[51] 基于 CMS 在 2012 年的全部数据，他说，“很明显我们正面对一种希格斯玻色子，然而要弄清它究竟是哪种希格斯玻色子，还有很长的路要走。”^[52] 它究竟是标准模型所预言的那种简单的希格斯，抑或仅仅是几个希格斯粒子中最轻的那一个，如同“超对称”（将于下一章讨论）等超越标准模型的后续理论所预测的那样？

另外，就算只有一个希格斯粒子，物理学家仍然期望更多新粒子有待发现，尽管发现它们需要更强大的设备，或许会超出目前设备的能力。标准模型最后的疑点正被扫清，这标志着研究者历经一个多世纪的努力所书写的粒子物理学的一章正被翻过，而令人激动的新篇章正在开启。

至少对于普林斯顿高等研究院主任罗伯特·戴格拉夫 (Robbert Dijkgraaf) 来说, 今后几十年内几乎不可避免的是, “世界上某处将出现一台新机器, 一台有史以来最大的‘显微镜’, 它将帮助我们进一步洞悉物质结构, 使我们更接近宇宙大爆炸的时刻。当前最大的未知数是, 这场伟大的探险将在何处启程。”^[53] 的确, 究竟是什么无与伦比的新机器将带领我们踏上新时代探索的征途呢?

参考文献

- [1] Gerard 't Hooft. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [2] Matt Strassler (interview). Harvard University, December 16, 2014.
- [3] Kathryn Jepsen. “Famous Higgs analogy, illustrated.” *Symmetry* (online). September 6, 2013. <http://www.symmetrymagazine.org/article/september-2013/famous-higgs-analogy-illustrated>.
- [4] David J. Miller. “A quasi-political Explanation of the Higgs Boson; for Mr. Waldegrave, UK Science Minister 1993.” <http://www.hep.ucl.ac.uk/~djm/higgsa.html>.
- [5] Kathryn Jepsen. “Ten Things you may not know about the Higgs boson.” *Symmetry* (online). March 1, 2012. <http://www.symmetrymagazine.org/article/march-2012/ten-things-you-may-not-know-about-the-higgs-boson>.
- [6] Brian Greene. *The Fabric of the Cosmos*. (New York, Alfred A. Knopf, 2004), pp. 252-264.
- [7] Lisa Randall. *Higgs Discovery*. (New York, Ecco, 2013), pp. 76-77.
- [8] Nigel Lockyer. “Massive thoughts.” *Symmetry*. April 24, 2014.
- [9] Brian Greene. *The Fabric of the Cosmos*. (New York, Alfred A. Knopf, 2004), p. 262.

- [10] Philip Ball. "Nuclear masses calculated from scratch." *Nature*. November 20, 2008. <http://www.nature.com/news/2008/081120/full/news.2008.1246.html>.
- [11] Juan Maldacena. "The symmetry and simplicity of the laws of physics and the Higgs boson." *Arxiv.org*. October 24, 2014. <http://lanl.arxiv.org/abs/1410.6753>.
- [12] Gerard 't Hooft. "After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?" Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [13] Nima Arkani-Hamed. "After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?" Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [14] "R.R. Wilson's Congressional Testimony, April 1969." Fermilab History and Archives Project. <http://history.fnal.gov/testimony.html>.
- [15] Dennis Overbye. "Physicists Inch Closer to Proof of Elusive Particle." *New York Times* (online). July 2, 2012. <http://www.nytimes.com/2012/07/03/science/physicists-inch-closer-to-proof-that-higgs-boson-particle-exists.html>.
- [16] Gary Taubes. "The Supercollider: How Big Science Lost Favor and Fell." *New York Times*. October 26, 1993.
- [17] Steven Weinberg. *Dreams of a Final Theory*. (New York, Vintage Books, 1992), p. 278.
- [18] Gary Taubes. "The Supercollider: How Big Science Lost Favor and Fell." *New York Times*. October 26, 1993.
- [19] Harry Lustig. "To advance and diffuse the knowledge of physics: An account of the one-hundred-year history of the American Physical Society." *American Journal of Physics*. 68 (July 2000), p. 632.
- [20] Lyndon Evans. "The Large Hadron Collider from Conception to Commissioning A Personal Recollection." *Reviews of Accelerator Science and Technology*. 3 (December 2, 2010), p. 261.

- [21] Dennis Overbye. "Asking a Judge to Save the World and Maybe a Whole Lot More." *New York Times* (online). March 29, 2008. <http://www.nytimes.com/2008/03/29/science/29collider.html?pagewanted=all>.
- [22] "LHC to Restart in 2009." *CERN Press Office* (online). December 5, 2008. <http://press.web.cern.ch/press-releases/2008/12/lhc-restart-2009>.
- [23] Lyndon Evans. "The Large Hadron Collider from Conception to Commissioning A Personal Recollection." *Reviews of Accelerator Science and Technology*. 3 (December 2, 2010), p. 279.
- [24] Sean Carroll. *The Particle at the End of the Universe*. (New York: Dutton, 2012), pp. 88-90.
- [25] Melissa Franklin. "Putting the Higgs Boson in Its Place" (lecture). Harvard University, October 30, 2014.
- [26] Lisa Randall. "Foreword." *Most Wanted Particle* by Jon Butterworth*. (New York: The Experiment, 2015), p. xiii.
- [27] "Particle Fever" (documentary). Directed by Mark Levinson, 2013.
- [28] Sean Carroll. *The Particle at the End of the Universe*. (New York: Dutton, 2012), p. 99.
- [29] "What is ATLAS?" *ATLAS Experiment* (online). http://atlas.ch/what_is_atlas.html.
- [30] "Why is CMS So Big?" Compact Muon Solenoid Experiment at CERN's LHC (website). <http://cms.web.cern.ch/news/why-cms-so-big>.
- [31] "LHC Machine Outreach." <http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach>.
- [32] Matt Strassler. "Will the Higgs Boson Destroy the Universe." *Of Particular Significance* (blog), September 10, 2014. <http://profmattstrassler.com/2014/09/10/will-the-higgs-boson-destroy-the-universe/>.
- [33] Matt Strassler. "A lightweight Standard Model Higgs Particle." *Of Particular Significance* (blog), December 5, 2011. <http://profmattstrassler>.

- com/articles-and-posts/the-higgs-particle/why-is-it-hard-to-find-the-higgs-particle/a-lightweight-standard-model-higgs-particle/.
- [34] Matt Strassler (interview). Harvard University, December 16, 2014.
- [35] Matt Strassler. “Why is it Hard to Find the Higgs Particle.” *Of Particular Significance* (blog). Undated. <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/the-higgs-particle/why-is-it-hard-to-find-the-higgs-particle/>.
- [36] Lisa Randall. *Higgs Discovery*. (New York, Ecco, 2013), p. 21.
- [37] Matthew Schwartz. “Discoveries at CERN—Panel Discussion.” Harvard University, October 23, 2014.
- [38] Matt Strassler. “Higgs Discovery: The Data.” *Of Particular Significance* (blog), July 6, 2012. <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/the-higgs-particle/the-discovery-of-the-higgs/higgs-discovery-the-data/>.
- [39] “Particle Fever” (documentary). Directed by Mark Levinson, 2013.
- [40] Sean Carroll. *The Particle at the End of the Universe*. (New York: Dutton, 2012), p. 184.
- [41] “Particle Fever” (documentary). Directed by Mark Levinson, 2013.
- [42] Celeste Biever. “Celebrations as Higgs boson is finally discovered.” *New Scientist* (online). July 4, 2012. <http://www.newscientist.com/article/dn22014-celebrations-as-higgs-boson-is-finally-discovered/>.
- [43] “Particle Fever” (documentary). Directed by Mark Levinson, 2013.
- [44] John Ellis. “Theory Summary and Prospects.” *Arxiv.org*. September 15, 2014. <http://arxiv.org/pdf/1408.5866.pdf>.
- [45] “Particle Fever” (documentary). Directed by Mark Levinson, 2013.
- [46] “The Large Hadron Collider.” *CoEPP* (online). <http://www.coepp.org.au/large-hadron-collider>.
- [47] Sean Carroll. *The Particle at the End of the Universe*. (New York: Dutton, 2012), p. 79.
- [48] Joseph Incandela. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.

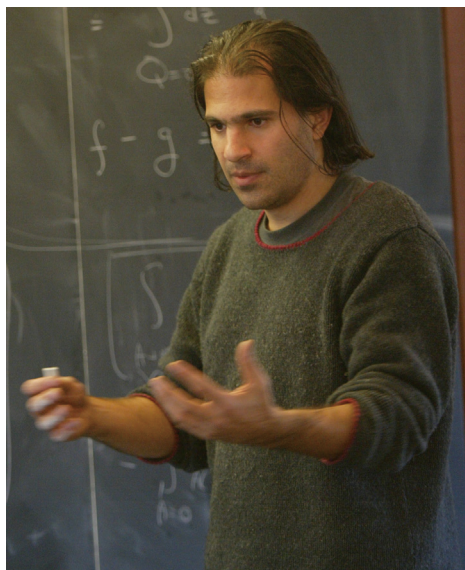
- [49] Edward Witten. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [50] Nima Arkani-Hamed. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [51] Sean Carroll. *The Particle at the End of the Universe*. (New York: Dutton, 2012), p. 186.
- [52] Cian O’Luanaigh. “New results indicate that new particle is a Higgs boson.” *CERN* (online). March 14, 2013. <http://home.web.cern.ch/about/updates/2013/03/new-results-indicate-new-particle-higgs-boson>.
- [53] Robbert Dijkgraaf, Institute for Advanced Study (telephone interview with the author), April 20, 2015.

第 3 章

超越标准模型

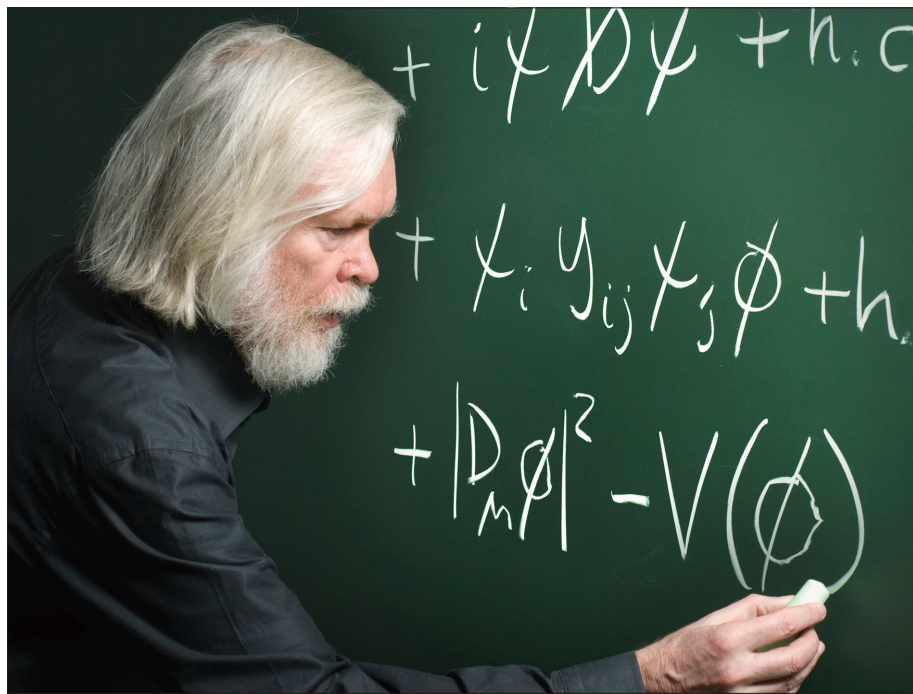
标准模型的缺憾

希格斯粒子的发现是一场轰动性的胜利。作为标准模型的顶点，它为实验与理论几十年来的进展画上了句号。物理学家几乎用了一个世纪完成了一幅伟大的拼图，而新发现的希格斯玻色子确实可谓这幅拼图的“最后一块”。标准模型如今就像客满的宾馆，连一间容纳新粒子的空房都没有。“我们现有的理论结构，描述了我们所能触及的能量范围内所有的相互作用，而且还能以数量级的方式自洽地外推到更高能量区域，这在历史上尚属首次，”尼玛·阿卡尼－哈梅德说。^[1]



尼玛·阿卡尼－哈梅德，普林斯顿高等研究院的理论物理学家与现象学家，他提出了探索超越标准模型新物理的很多想法（照片由 Andrea Kane 摄，普林斯顿高等研究院提供）

然而这一论断绝不意味着粒子物理学家的工作已经完成或接近完成。“有人或许会主张标准模型之外别无新物理，”CERN 的物理学家约翰·艾利斯指出，“然而历史的垃圾堆里不时可见当时声名显赫的物理学家（还有其他人）过早地宣布‘游戏结束’。”例如 1894 年，就在放射性与电子被发现前，阿尔伯特·迈克尔孙（Albert Michelson）曾断言“物理学中所有重要的基本定律和事实都已被发现”。无独有偶，开尔文勋爵（Lord Kelvin）在 1900 年宣称，“物理学如今已没有什么新东西可被发现了，今后的所有工作不过是越来越精确地测量。”之后不久，爱因斯坦就提出了光子，并开创了狭义相对论。^[2]



约翰·艾利斯，超对称的重要倡导者，CERN 的理论物理学家，致力于新粒子对撞机上的物理学等研究领域。（照片由 CERN 提供）

对于不打算提早退休的粒子物理学家而言，等待他们的巨大挑战其实应当是一种安慰。而对入门者来讲，即使标准模型能以空前的精度描述所有已知粒子，即使它做出的许多预言后来都被证实，它的应用范围仍然仅限于宇宙中相当小的一部分。该模型的缺陷之一，是它未能涵盖或论及万有引力。然而，正是万有引力塑造了宇宙，并促使

形成星系、星系团和超星系团等宇宙大尺度结构。而且，量子理论是标准模型的基础，但爱因斯坦的广义相对论所描述的引力定律与量子理论并不融洽，有时甚至相互冲突。物理学家向来渴望将它们融为一体，成为自然的统一理论。人们在此方向虽有进展，但距其目标仍然遥远。对这渴望已久的统一，标准模型也没有提供通向它的道路。

此外，基于多重证据，天文物理学家如今相信，由夸克与轻子构成的普通物质在宇宙各组分中的比例不到 5%。据最新估计，宇宙中约 27% 的成分由“暗物质”贡献。暗物质粒子在宇宙大爆炸期间大量产生，它们与已知粒子的性质不同。标准模型既无法解释这些物质，也无法提供构成这种奇异物质形态的候选粒子。

反倒是天文观测与宇宙学研究提供了线索。当前理论认为，暗物质在恒星形成中有所贡献，还是使星系与星系团成形的“引力胶水”。暗物质之“暗”，意指我们无法直接看到它。暗物质不会发出、反射或吸收任何波长的光线。正因如此，即便我们能通过天文观测推知其存在，也还未能确定这种晦暗之物的真正本性。天文观测也告诉我们，寻常的不发光物质，比如死亡的恒星、灰尘或中微子，尚不能防止星系这样的结构四散开来。我们需要某种前所未见的新物质来完成这项任务。

宇宙中另外 68% 的质量和能量仍无踪迹。有人认为，它们由同样神秘的暗能量构成，这种暗能量弥漫全空间，使宇宙加速膨胀。当谈及暗能量，物理学家简直陷入了黑暗。他们不知道，暗能量究竟是否是一种粒子，他们也未能设计出揭示其本性的任何加速器实验。关于我们所知甚少的暗能量，可以确定它不是标准模型的一部分——标准模型对其一无所言。

同时，标准模型亦无法解释宇宙大爆炸开创万物的物理机制。这很大程度上是因为，我们目前的粒子物理理论与描写引力的广义相对论相互脱离。此外，当前的宇宙学研究告诉我们，大爆炸所创造的物

质与反物质基本等量，但宇宙如今几乎全是物质——这又是一个标准模型无法解释的问题。事实上不但无法解释，它甚至与标准模型相冲突。

尽管标准模型可谓物理学史上最成功的理论，但它所详尽分类并描述的粒子在全宇宙中也占不到5%，因而留下了很多有待探索的问题。用约瑟夫·因坎德拉的话说，“我们的工作还有95%不完整。想真正理解我们所在的宇宙，还有很长的路要走。”^[3]

与此同时，虽然标准模型被认为是大体上完备自治的理论，但仍有许多基本问题仅凭该理论还难以回答。“它的运动方程涉及一系列数量，比如夸克的质量，这些数只能从实验输入，理论并不解释它们为何如其所是，”斯蒂芬·温伯格说，“如果标准模型就是故事的全部，那就要求中微子质量为零。然而实际上它们的质量只是很小而已，比电子质量的百万分之一还小。”^[4]中微子怎么会有这样微小的质量呢？（下一章将进入这一问题，很多物理学家相信其答案几乎肯定涉及超越标准模型的物理，至少也要修改标准模型。）为何基本粒子的质量如其所是？为何有3种相互作用而不是2种或4种，有3代粒子而不是2代或4代？

虽然人们很早就预测到了新近发现的希格斯玻色子，但从许多方面来看它仍是最为神秘之物。这一粒子似乎与早期宇宙的电弱相变有关，它使原本无质量的基本粒子获得质量。然而，标准模型无法描述这一相变的本性，也不能解释电弱能标与普朗克能标之间巨大的鸿沟。

很多科学家相信，希格斯玻色子就是通向未知新物理的桥梁，它不仅能提供上述部分问题的答案，还能指出通向更普遍理论的道路。CERN研究与计算主任塞吉奥·贝托鲁齐（Sergio Bertolucci）指出，希格斯的发现使“我们扫清了已知的未知。但我们知道这还不够。”还有更多问题需要留心。^[5]

譬如，对于所知甚少的希格斯场，希格斯粒子是我们理解它的主要手段。根据哈佛物理学家马特·斯特拉斯勒的说法：“我们不知道[这种场]为何非零，我们也不知道它为何与不同的场有不同的作用。”——与顶夸克之类的粒子作用强而与电子之类的粒子作用弱。我们也不知道，实际上究竟只有一种还是有若干种希格斯场。^[6]对于希格斯粒子自身也有类似的问题。目前，CERN 的实验已经以相当的精度确定了它的质量。截至 2015 年 3 月，ATLAS 与 CMS 数据的结合对希格斯质量的最佳估计是 125.09GeV，误差在上下两端皆为 0.24GeV，相当于 0.2% 的测量精度。^[7]据 CERN 称，这是“到目前为止 LHC 上所做的最精确测量。”^[8]

尽管该测量精度很高，而且今后会随着 LHC 的数据积累而进一步提高，我们仍然需要更深刻的理论从第一原理计算出希格斯的质量。而且，还有许多关于这个粒子的问题有待回答。例如，这个 2012 年发现的玻色子究竟是同一类希格斯粒子中的最简者，还是如某些理论所称，从属于种类更为多样的粒子集合？我们马上将讨论的“超对称”预言了不止一个希格斯玻色子，在某些模型中会有 5 个独立的希格斯玻色子，包括带正电和负电的变种。当然，其他理论还会做出不同的预言。

确定希格斯身份的最佳和最显然办法，就是更仔细地检测它，尽可能将它的诸多性质测量得更完整、更精确。物理学家想要看清这种粒子的一举一动与所作所为。为达此目的，他们需要更精确地测量该粒子的质量与自旋。物理学家还需要监测其相互作用，确定其衰变成各种粒子的产率，并将由此而得的数值与理论预言相比较。“只有了解希格斯粒子的性质，我们才可能理解未来粒子物理学的焦点，”中科院高能物理研究所王贻芳说。^[9]

“我们以前从未见过像这样的粒子，”阿卡尼-哈梅德补充道，“就好像我们为一种奇异动物拍下了第一张照片。目前这幅图像还很模糊，我们需要使它更清晰。”^[10]

自 2013 年初开始, LHC 经历了一次重要整修, 直到 2015 年下半年重新开始全力运行。在此期间, 连接加速器磁铁的一万多个超导接头被重新强化, 使磁铁能够以更高的场强运转, 从而可实现更为高能质子碰撞。此外, 还升高了对撞机的电压, 升级了低温学器件。经过翻新之后, 该机器从 2015 年 6 月开始进入全速运行, 对撞能量几乎翻倍, 从首轮运行的 8TeV 提升到了 13TeV, 这已接近其设计能量。^[11] LHC 在第 2 轮运行结束前有可能进一步实现 14TeV 的对撞。^[12] 质子对撞数量也将升高, 这会提升可供收集的数据量, 从而使 LHC 较从前灵敏 10 倍, 观察罕见现象的能力也强 10 倍。^[13] 与此同时, 物理学家还要更精确地测量希格斯玻色子, 这一目标肯定能实现。

当然, 人们对这台升级过的设备另有期望。物理学家希望 LHC 能看见新粒子。不过即使看见了, 据 CERN 前领导卢查诺·迈安尼所说, “LHC 不太可能看见一切。LHC 其实更像黑暗中的灯盏, 对于我们相信就在那里的动物, 这盏灯能照亮它的尾巴, 但不足以完全揭示其本性。”^[14]

阿卡尼-哈梅德也同意, 我们不大可能通过从 8TeV 升级到 13TeV 的 LHC 看到“完整的故事”。有鉴于此, 明智的策略是开始规划能量与精度更高的机器, 就像中国正在规划的 100TeV 对撞机。^[15] 利用这种规模的设备, 我们不仅能更好地了解希格斯玻色子及相应的希格斯场, 还将获得更多发现标准模型之外新粒子的机会。这种设备正是通向未知物理世界的门径。

中国倡议建造的对撞机, 就是为这两大目标而设计, 第 5 章将用大量篇幅进行介绍。这台机器的运行将分两个阶段。第一阶段是运行在 240GeV 左右的“环形正负电子对撞机”(CEPC)。随后, 将利用同一隧道将其转换为“超级质子对撞机”(SPPC), 对撞能量将大幅提高(因为质子更重), 或许高达 100TeV。

质子对撞机的潜力在于发现质量空前重的新粒子, 而能量较低的正负电子机器自有其优点。日本目前有意主持建造一台正在规划中的

国际直线对撞机（ILC），长达 30 余千米，它也具有这类优点。（第 5 章将用大量篇幅介绍 CEPC、SPPC 与 ILC。）

对实验家而言，正负电子对撞比质子对撞的信号更干净。就物理学家目前所知，电子与正电子是简单的点状粒子，没有内部结构。与此相反，质子远为复杂而混乱。人们有时将质子描述成一袋夸克与胶子的混合体，生灭不息的虚粒子涌现其中，在往返不定的过程中吸放能量。由于这些额外因素掩盖了一些微妙的物理效应，使整个图像变得晦暗难解，因而精确地测量质子对撞的产物就更加困难。

ILC 项目欧洲区域主任、牛津物理学家布莱恩·福斯特（Brian Foster）将质子对撞比作两个橙子的高速撞击。假设你真正感兴趣的是两个橙子籽对撞后会发生什么。可是这很难辨认，因为那些果汁、果肉及其他碎片混杂其中，从对撞区域一同散射出来。^[16]

运行能量远高于希格斯质量 125GeV 的正负电子对撞机，可通过微调而大量制造希格斯玻色子，因此，这类机器时而被称为“希格斯工厂”。此外，这种机器还可用于精确测量，其精度远非 LHC 这类质子对撞机所能及。哥伦比亚大学的物理学家布莱恩·格林恩将 LHC 比作一个“大锤子，将质子锤在一起以创造任何我们没有见过的东西。这是它的专长。”而另一方面，正负电子对撞机更像“一把手术刀，一种能够进行更精确分析的精密仪器。”这种机器可被用在值得密切观测的能量区域，以辨别特定的粒子。他说：“这是我们现在就想开始建造的机器。”^[17]

王贻芳对此表示同意，他尤其想看到这种机器在中国实现（虽然设计成环形而非直线形）。正负电子对撞机能提供很多我们亟需的精确测量，王贻芳说，“希格斯是标准模型中最重要的粒子，我们对这一模型中的其他粒子知道得很多。比如，我们已将电子测量得很精确，我们需要对希格斯做同样精确的测量。”^[18]

如前所述，物理学家想解开围绕希格斯的许多谜团，其中最令人困惑的问题大概非希格斯质量莫属。近来 LHC 对此测量的结果略高于 125GeV。使理论家夜不能寐的问题是，希格斯质量为何如此小。作为标准模型的基础，量子场论的计算结果显示希格斯玻色子的质量应远大于当前值。事实上，这一计算结果似乎会将希格斯质量上抬 10^{16} 或 10^{17} 倍，直到位于 10^{19}GeV 左右的普朗克能量标度或质量标度。普朗克能标对应于 10^{-35} 米的微小距离。在只考虑量子场论与广义相对论的情况下，普朗克能标基本上就是尺度的终点，我们似乎无法通过升高能量或缩小距离来跨过这一点。如欲继续前行，我们就需要新物理定律的指导。普朗克能标代表能量和距离的临界值，在那里万有引力就不再表现为连续的作用力。普朗克能标还表征了引力与其他相互作用强度相当，从而必须考虑其量子效应的尺度。换言之，在此转变点处引力的量子理论将起支配作用，正如目前描写电磁作用、弱作用及强作用的量子理论那样。

但是理论为何会认为希格斯质量应该高得多？为何会认为此质量更靠近普朗克能标而不是如同 CERN 所测量的那样？答案在于一种对于非物理学家而言并不直观的量子力学效应。如同希格斯这样的亚原子粒子不会静坐不动。它会以高速飞行，而且由于它有质量，希格斯也会像其他有质量粒子那样与希格斯场相互作用。但是，它同时也会与途中相遇的其他粒子发生作用，偶尔还会突然变成其他粒子，瞬间再变回来。比如，它能暂时变成一对顶夸克与其反夸克，或者变成一对 W 玻色子，甚至变成一对非常重的虚粒子，然后很快又恢复希格斯的面目。所有这些相互作用、相互转换，以及粒子种类的切换，都会对希格斯的质量产生一种量子力学的贡献，并最终使之接近 10^{19}GeV 。

当然，这并非我们在 LHC 上看到的情形。我们也不可能在仅有 10TeV（即 10^4GeV ）的对撞机上探测到那样重的粒子。当前，这是研究者正努力解决的难题之一：如何理解这一粒子的轻质量（具有讽刺意

味的是，即使如此，质量的测量值也还落在预期的范围内）。各种粒子的量子贡献貌似以某种方式相互抵消而非相互叠加，而这如何发生几乎完全是个谜。将其解释成巧合无法使多数物理学家感到满意。他们认为这是典型的“微调”，也就是说，某人或者某种未知力貌似正在以近乎荒唐的精度调节自然的仪表盘。

这一微调的精度必须达到 35 位有效数字，远远比你的铅笔尖立在桌面上所需的微调还严重。某人或某物一定正在用极细而看不见的秘密引线使这支铅笔保持站立，使之看上去违反了我们的常识、引力和概率论。丽莎·兰道说，“微调几乎肯定是反映我们无知的羞愧标志。”^[19]因而，粒子物理学家倾向于为我们的宇宙为何如此寻找更自然更合乎逻辑的解释。

阐明这个困境的另一方式是考虑希格斯场的大小，而不是希格斯玻色子的质量本身。如同生灭不息的虚粒子会显著贡献质子的质量那样（如第 2 章所述），虚粒子也对希格斯场有量子的贡献，使其强度或能量向着普朗克能标升高。包括 W、Z、希格斯玻色子在内的基本粒子通过与希格斯场的相互作用获得质量，因而位于普朗克能量附近的希格斯场就几乎不可避免地致使所有基本粒子超级重，这些粒子会如此重，以致有塌成黑洞的风险。换言之，250GeV 左右的电弱能标，也就是希格斯场在真空中的大小，同样是与各种标准模型粒子质量相关联的能标，它将会更加接近普朗克能标，而不是与之相隔 16 个数量级。这一悬殊，使很多物理学家认为奇怪和“不自然”，有时被称为“等级问题”。

描述等级问题的方式有很多。它与希格斯场的强度、希格斯玻色子的质量，以及其他已知基本粒子的质量都有关系。与普朗克能标相比，它们都低得出奇。这一问题还能用引力与电磁、弱、强作用间巨大的强度差异来刻画。事实上，两个电子间的引力比其电磁作用力弱 10^{43} 倍左右。^[20] 而若电子比实际值重 10^{22} 倍，即重达普朗克质量，则这些力的强度就相互吻合了。^[21]

但是自然界中作用力的强度为何相差如此巨大？为何已知粒子的质量与普朗克能标间有如此巨大的鸿沟？这就又将我们带回到了折磨物理学家数十年之久的等级问题。很多物理学家相信，一旦解决此问题，就有可能找到超越标准模型并通向新物理与新粒子的道路。^[22]

这一问题的主角可被归结于希格斯玻色子自身。如果那些被认为抬高了希格斯质量的量子修正以某种方式相互抵消，那么这种相互抵消究竟是如何发生的？费米实验室的物理学家唐·林肯（Don Lincoln）主张，直抵这一困境的核心，不是选做题，而是强制性的任务。如果2012年发现的粒子真的是质量为125GeV的希格斯玻色子，如实验家所展示的那样，林肯说，“这在标准模型中完全是不自然的，我们必须发现某种新物理来解释它。”^[23]

超对称

幸运的是，我们对此已有一种回答，至少是部分的回答，其想法是，宇宙中尚存在一种前所未有的新对称性，称为超对称。超对称与其说是一种关于宇宙的新奇理论，不如说是一类宇宙理论的共同特征，即一种新的原理。如果此原理有朝一日被确证，则可与诸如能量和动量守恒的神圣原理并列。超对称的重要进展始于20世纪70年代早期。有人视之为相当抽象的数学概念。按照爱德华·威滕的说法，它展现了“只能用量子力学概念描写的时空新维度。”^[24]

不过超对称也有更为实在的物理效应。这一概念到1981年时已经发展为标准模型的扩展版，由斯坦福的物理学家萨瓦斯·狄莫普洛斯（Savas Dimopoulos）与哈佛的物理学家霍华德·乔吉（Howard Georgi）提出的版本就是一例。或许有朝一日，可通过经验检验这种理论。如果人们最终发现自然界是超对称的，密歇根大学的物理学家戈登·凯恩说，“标准模型并不因此而错误，它将成为对自然界更完整描述的一部分。这就是科学进步的方式。”^[25]

这种“更完整描述”的要点之一是，每种标准模型粒子都有其更重且尚未发现的伙伴。这个提议将会使宇宙中基本粒子的数目加倍。更确切地说，超对称断言，标准模型中的每个玻色子（如光子、胶子或希格斯粒子）都有一个费米型“超伴子”，按照约定，它们的名字以“微子”结束（比如光微子、胶微子、希格斯微子）¹。反过来，每种标准模型费米子（比如夸克、轻子、电子、中微子）都有一个玻色型超伴子，按照约定，它们的名字以“标”开头（如标夸克、标轻子、标电子、标中微子）²。粒子与其超伴子应有相同的质量，但其自旋相差半整数。（注意到玻色子具有整数自旋而费米子有半整数自旋，这一点便容易理解。）

已知玻色子与费米子中没有任何一对具有超对称所假设的超伴子的特性。换言之，这些假定的粒子均未被发现。如果它们真的存在，那么实验物理学家将面临大量的工作，因为有大约 17 种新粒子有待发现、研究和刻画。标准模型中的 6 种夸克、6 种轻子、5 种玻色子（光子、胶子、Z、W 粒子、希格斯）就需要至少 17 种额外的超伴子。实际还可能更多，因为每种普通粒子原则上可以有不止一个超伴子。

超对称描述了荷力粒子（即玻色子）与物质粒子（即费米子）之间前所未知的亲密关系，因而代表了自然界中统一作用力与物质的新对称性。构思这一想法的理论家们出乎意料地证明了，这些物理方程在其中的玻色子与费米子项对调后保持不变。

1 英文中费米型超伴子以“-ino”结束，如光子（photon）的超伴子——光微子（photino）。这一源自意大利语的词尾有微小之意，故汉语文献通常翻译成“微子”。顺便澄清一点：“中微子（neutrino）”并非“中子（neutron）”的费米型超伴子，更与下文将会提到的“中性微子（neutralino）”毫无关系。——译者注

2 英文中这类粒子以“-s-”开头，取其“标量（scalar）粒子”之意。——译者注

作为类比，可以想象 22 个踢足球的女孩，她们来自 11 对双胞胎姐妹。为便于讨论，我们暂且不切实际地假设，每个女孩和她的孪生姐妹长得完全相同，具有相同的身材、竞争力、比赛技术，等等。我们进一步假设这些姑娘被分为两队，且每对孪生姐妹在两组中各有一位。分别称这两队为玻色子与费米子。现在比赛开始。一如预料，两队实力相当。如果在比赛当中，教练开始对换球员，将一个女孩与她的孪生姐妹对调，那么比赛结果应该不会被明显改变。一切将会以相同的方式展开。这与超对称理论所展示的结果类似：交换其他性质完全相同的玻色子与费米子不会改变某一物理过程的结果。

然而我们从充分的实验证据知道，超对称的一个方面与真实情况不符：粒子与其超伴子不可能具有相同的质量，且超伴子必须更重。譬如，如果标电子与电子质量相同、上标夸克与上夸克质量相同，那么这两种标量超伴子肯定早已被发现。此外，如果标电子与电子质量相同，那么它们将会在原子中彻底改变化学结构，将我们熟识的世界变成一个陌生的世界。因而，标电子与电子质量相同的可能性就被彻底排除。这同时意味着，如果超对称粒子存在，那么它们必须比其已知的伴粒子更重，或许要重得多。

对此另一种表述方式是，如果超对称作为自然界所实现，那么它必是一种“破缺”的对称性。标准模型粒子与其超伴子间的质量差就表明了超对称破缺的严重程度。

破缺的对称性并未完全消失。它们仍在那里，只不过以某种弱化的形式隐藏起来，因而更难辨认。物理学家并不介意对称性破缺的概念。一如所知，电弱对称性就是破缺的。的确，对称性破缺的例子在我们周围的世界中比比皆是。举近处的地球为例，它具有某些球对称的性质，但这一对称性并不完美，因为我们的星球并非完美的球体。人的左右脸相当对称但绝不完美对称。通过仔细观察，我们总能发现左右脸之间在形状与特征上的差异，比如雀斑、粉刺、皱纹，等等。^[26]

另一个对称性破缺的例子是带有小瑕疵的旋转陀螺，其一边比另一边稍重。这一缺陷使旋转的陀螺更易摇晃，因而更易倒向一边，很可能是倒向较重的那边。这个陀螺关于其转轴仍然展现出一定程度的旋转对称性，但对称性的程度低于没有瑕疵完全均匀的陀螺。^[27]

既然超对称必须受到某种限制，既然现实的超对称必须破缺，它又何以在过去几十年中吸引了数以千计的物理学家呢？原因之一是，超对称具有同时解决等级问题与暗物质之谜的潜力，尽管人们当初并不是为解决这两个问题而提出了超对称。超对称模型预言希格斯质量应当低于 130GeV，而这已成为事实；^[28] 顶夸克被发现 10 年之前，超对称就预测它应当比其他夸克和轻子重得多。

超对称涵盖的范围比上述问题还要广阔得多。它从理论方面解释了粒子的质量分布与各种力的强度，同时解释了我们的宇宙的许多性质。^[29] 数十年来物理学家着迷于这一想法，不仅因其广阔的视野，还因为其深刻而诱人的数学结构。将超对称纳入物理学的基本框架后，多种问题都变得更易解决。而且，超对称能解决问题，或者说提供了问题的解，但“它并非为解决这些问题而被提出，这本身就强烈地暗示了，超对称也许是自然规律的一部分，”戈登·凯恩辩论道。^[30]

让我们首先考虑，对于长期困扰物理学家的等级问题，超对称能为我们做些什么。这里的基本前提是，新的（超对称）粒子会使希格斯玻色子的质量与希格斯场的能量降低，降低的程度与普通（非超对称）粒子使之升高的程度几乎完全相同，其中的道理出奇地简单。对于入门者，我们先复述超对称的一个重要特征，即每种标准模型玻色子与一种费米型超伴子配对，而每种标准模型费米子与一种玻色型超伴子配对。当玻色子与希格斯场作用时，会使希格斯场的能量升高，因而使希格斯粒子（以及其他基本粒子）更重。另一方面，费米子对希格斯场的能量及希格斯玻色子的质量有负的贡献。换言之，费米型与玻色型的超伴子将会抵消标准模型费米子与玻色子的效应。然而这一抵

消并不完全，因为刚才提到的超对称破缺导致超伴子比对应的普通粒子更重。因而，只要超伴子的质量不太重，希格斯质量与希格斯场的能量就会受到控制，而不至于产生混乱。

“超对称帮助稳定了希格斯玻色子的质量并控制住了量子修正，但仍然需要首先得到正确的希格斯质量，”艾利斯说。“如果从一个很轻的希格斯质量出发，那么超对称有助于使它保持很轻，但它并不解释一开始怎样获得这样小的质量。”^[31]

对等级问题可能的解答本身就是大新闻，然而超对称还能做得更多。如果我们的宇宙的确有超对称，那么在宇宙大爆炸期间，就会大量产生超伴子与标准模型中的熟知粒子。超伴子很不稳定，会很快衰变掉。为了与观测结果相容，许多超对称理论规定超伴子必须成对出现和消失，而不能单独出现和消失。对于这一规定，更简单的说法是，当一种超对称粒子衰变时，必将出现另一种超对称粒子。你不能从一个超伴子出发，经过一系列过程，结束于没有超伴子的状态。而且，超伴子，以及任何其他粒子，都只能衰变成更轻的粒子（否则就会破坏一些古老而重要的守恒律）。

这些事实的逻辑推论是，超伴子将持续衰变，直到其衰变链条的终点，即衰变出最轻的超伴子。总而言之，这种粒子将在宇宙中大量产生并广为分布。然而一旦衰变产物达到最轻的质量，就无法继续衰变，因为这不会衰变出超伴子，与上述原理相悖。因此，最轻的超伴子必然完全稳定。而且，由于我们并没有在加速器实验或天文学研究中观测到这种粒子，就需要假定最轻的超伴子必须有很弱的相互作用，因而很难被发现。为了保持隐蔽，这种粒子必须不带电荷，也不能感受到电磁力或强作用，否则将很容易被探测到。

这种粒子不会参与到恒星或星系的形成中，但它是遍及全宇宙的暗物质的主要候选者。当前，理论家最青睐的暗物质候选者是“中性微子”，这是4种粒子的总称，它们由光子、Z玻色子与希格斯玻色子

的超伴子（即“光微子”、“Z 微子”与“希格斯微子”）以不同的方式混合而成。

这部分解释了超对称的魅力所在，解释了它使物理学家数十年来着迷其中的一个原因。因为，如果自然真的具有这种对称性，那么它将为基本粒子的种类加倍，同时提供解决等级难题与暗物质之谜的出路。也许宇宙的许多费解之处是因为我们只看到了它的一半。“超对称一并回答了所有这些问题，而且无可否认，这套回答比任何其他已有理论都更简单、更优雅、更美妙，”费米实验室的物理学家丹·胡珀宣称，“如果我们的世界是超对称的，所有这些谜团都恰好拼在一起。我们越是研究超对称，这一理论就越令人信服。”^[32]

诚然，超对称是诱人的想法。但是，除非得到实验证据，否则我们就无法确知，如此美妙的超对称是否会真的被写入自然法则之中。LHC 的首轮运行结束于 2013 年 2 月 14 日。在此轮运行中，人们并未收集到这一美妙想法的可靠证据。相当数量的物理学家现在开始表达他们的怀疑，但是很少有研究者打算放弃寻找。

研究者有多种手段来搜寻超伴子。如上所述，最轻的超伴子会形成难以捕捉的暗物质。LHC 采取的策略之一是，大量产生希格斯玻色子，然后寻找稀有而出乎预料的衰变方式。在其中就可能发现未知粒子，也许就包括最轻的超对称粒子。“在 LHC 上仍然很难探测超对称的轻质量部分，”斯坦福的理论家迈克尔·佩斯金（Michael Peskin）坚称。他相信正负电子机器搜寻希格斯奇异衰变的能力比强子对撞机更胜一筹。^[33]他也相信，正负电子对撞机在直接产生暗物质粒子方面更具优势，除非那些粒子恰好非常重，以至于必须用强子对撞机来产生它们。^[34]

哈佛大学的马特·斯特拉斯勒表示同意。诸如规划中的 ILC 与中国的 CEPC 这类正负电子机器具有更高精度，可以更好地观测稀有相互作用，也能在此过程中更好地寻找未知粒子的迹象。CEPC 堪称真正的“发现机器”，而不只是希格斯工厂，他说，“这类机器自有其地位，它

将我们带向一个问题：既然希格斯已被发现，我们还想拿希格斯做什么？嗯，你想细致地检查希格斯应该做什么，但也想检查希格斯不应该做什么。这时你可能会拣出罕见的事例，比如每一百万次中发生一次。当你找到它们，你或许正在发现新的轻粒子，而这些粒子按照规定就处于标准模型之外。”这些粒子也许不会通过任何其他方式产生，它们有可能提供解锁自然深层奥秘的钥匙，比如暗物质究竟是什么。而发现它们的唯一方式也许就是通过希格斯的衰变。但由于各种背景噪声，在 LHC 上观测就会很困难。^[35]

由于质子对撞机可达更高的能量，它们将有助于搜寻正负电子机器难以企及的更重的超伴子。研究者必须布下大网，因为超对称虽然预言了大量新粒子，但没有指明在什么能区可发现它们。再次强调，超对称不是一个理论，它可以采取各种形式呈现出多种面貌。因而，有大量超对称模型被提出。不过，大多数搜寻策略的路数都相同。物理学家在质子对撞之后，依靠探测器的帮助，测量撞击出的所有已知粒子所携带的能量。如果有任何超伴子产生，它们将即刻衰变，其唯一踪迹将是“丢失的能量”与“丢失的动量”，即初始对撞与撞击产物间能量与动量的失衡。对撞前与对撞后的能量（与动量）理应相等。因而两者间的任何差异就将提示观察者错过了某些东西。

当质子中的夸克、反夸克与胶子对撞时，它们会产生一系列粒子，可以想象，其中会有这些初始粒子的超伴子：标夸克、反标夸克与胶微子。这些超伴子最终衰变到所允许的最轻超伴子，它或许就是当前最热门的暗物质候选者——中性微子。研究者所寻找的特别信号是单个高能夸克的喷注，或单个已知粒子朝一个方向射出，比方说朝左，但是没有朝右出射的东西。这种失衡，即动量缺失的迹象，有可能为我们提供超对称及暗物质的第一个证据。“这种所谓的单喷注事件看上去或许很奇怪，”哈佛物理系主任、ATLAS 成员森井政宏（Masahiro Mori）评论道，“它貌似会破坏动量守恒，它正告诉我们，一些看不

见的东西向另一边跑了。当我们谈论 LHC 上搜寻暗物质时，单喷注信号几乎总是最强有力的探针，无论是单光子、单 Z 玻色子，还是单希格斯玻色子，等等。”^[36]

“你知道‘单手击掌之声’这个说法³，”艾利斯问。“嗯，单束粒子喷注又有何声音？它可能就是暗物质。”^[37]

LHC 于 2015 年 5 月以相对低能的质子对撞开始了第 2 轮运行。在为该轮运行做准备的过程中，森井解释说，实验家按照其产生的难易程度将超对称粒子归类。“我们知道夸克与胶子有强作用，如果加入超对称，我们就得到了标夸克与胶微子。”他说，这是首要的努力方向。在 LHC 重启之后，搜寻标夸克与胶微子将是第一年运行的焦点。“如果我们发现了其中任何一个，那就很棒。如果没有发现，我们就去对付那些不太容易找的东西。”

日程表上的重要事项是寻找“最轻的超对称粒子”，亦即“最轻的超伴子”，这两个短语的首字母缩写皆为 LSP。多数模型认为 LSP 是一种中性微子，它可通过夸克-反夸克对撞及顶夸克超伴子（即顶标夸克或简称“标顶夸克”⁴）的衰变而产生。“我们不知道顶标夸克有多重，但我们认为它至少重达几百 GeV，”森井说，“超对称的好处是，我们即使不知道所寻找粒子的质量”——而且事先也没有办法计算它们的质量——“我们仍然知道它们的耦合强度，因为顶夸克与顶标夸克耦合到希格斯场的强度应该相同。”

森井提到的“耦合”，指的是粒子与希格斯场的相互作用有多强。举例来说，带电粒子与电磁场相互作用的强度，取决于该粒子的电荷。与此类似，一个粒子所体验到的强作用力，依赖于其所携带的“色荷”。

3 这是一则著名的禅宗公案。——译者注

4 如同前文所讲，按照加“s-”标记标量超伴子的约定，顶夸克（top quark）超伴子“标顶夸克”的英文恰为“stop”。——译者注

物理学家也相信，诸如夸克与轻子这类粒子与希格斯场相互作用的强度取决于该粒子的某种性质，这种性质与电荷或色荷类似，但这种性质究竟是什么还不完全清楚。他们进一步假设此相互作用的强度对于一种粒子与其超伴子是相同的，因为他们确信超对称在此方面并未破缺。利用从寻常（即标准模型）粒子所学到的经验，物理学家能够确定产生各种超伴子的概率，同时预测这些超对称粒子如何衰变。森井说：“从这个角度讲，理论几乎没什么周转的余地。”^[38]

不过他们仍必须通过观察确保这条理论线索指出的方向是正确的。当然，在LHC重新开机并以13TeV运行后，没有人能确定会出现什么。“如果我们知道会发现什么，那我们早就回家了，”哈佛的物理学家梅丽莎·富兰克林（Melissa Franklin）说。她也是ATLAS组的成员。^[39]

悬念巨大。物理学家在好奇下一轮数据采集将揭示什么。阿卡尼-哈梅德认为：“这里没有坏答案。我们只是不知道自然界沿哪条路走。”^[40]如果我们仍然只看到希格斯而没有其他新粒子，那将会使现有的看法备受压力，甚至失效，这倒未必是坏事。当19世纪80年代的迈克尔孙-莫雷实验没能测到以太这种长期假设的光介质时，阿卡尼-哈梅德说，“那就预示着物理学中范式的转换。”^[41]

当然，诸如探测到一个真正的超伴子之类的惊人发现仍会使他感到兴奋。那将不只是绝佳地证实提出了几十年之久的概念，同时确保了还有大量新粒子有待发现，而且它们很可能近在咫尺。任何关于是否应该建造更大更强力对撞机的争论都会顷刻烟消云散，唯一留下的问题会是，我们能建造得多快。“发现超对称将会是20世纪初以来我们所目睹的最惊奇的事情之一，”阿卡尼-哈梅德继续道。^[42]这无疑会将粒子搜寻者与理论家带向光明而激动人心的未来。

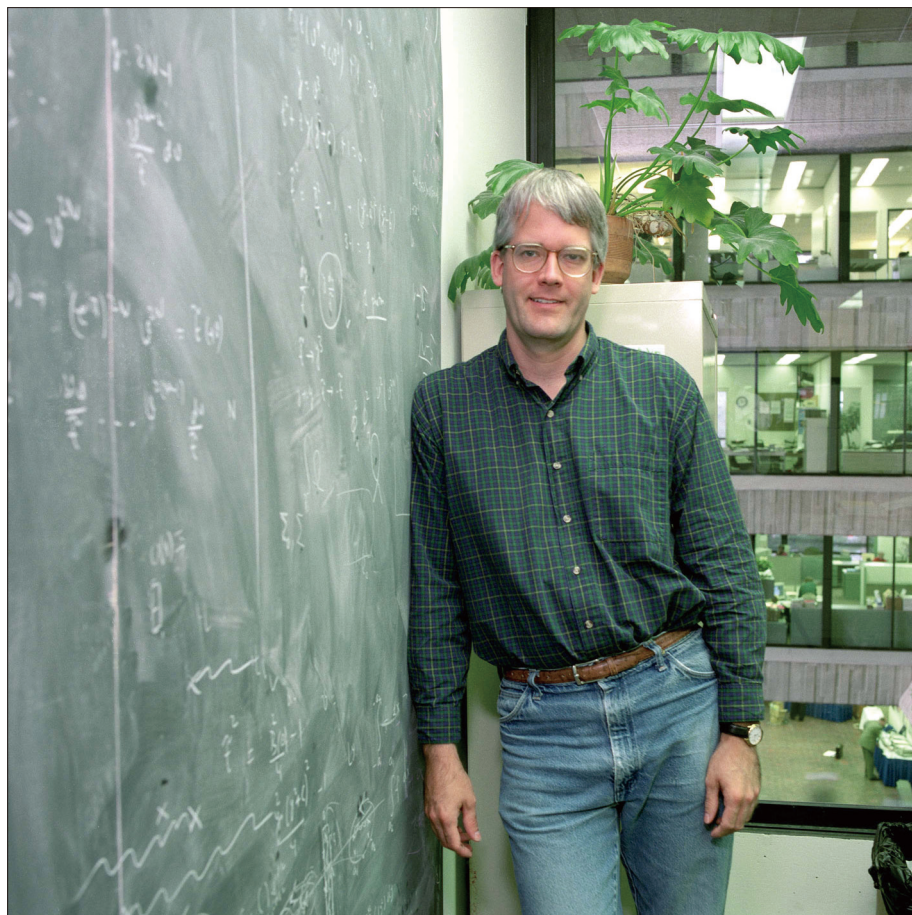
他在IAS的同事爱德华·威滕补充道，这一发现“将会成为物理学中真正的里程碑，超对称与更富雄心的理论想法之间的密切关系，将会使这一发现更为激动人心。的确，利用弦论的框架，理论物理学家

在统一引力与其他基本粒子的作用力方面已取得一些成功。而超对称正是弦论的基本要素之一。”^[43]事实上，数学中已证明，在保证爱因斯坦的理论与我们所居的世界没有冲突的前提下，超对称是广义相对论中唯一能够添加的对称性。换言之，它有可能成为时间与空间的最终理论。^[44]此外，就我们目前所知，弦论能够导出标准模型粒子的唯一途径是加入超对称。^[45]因此，威滕补充道：“超对称的发现一定会给予弦论巨大的激励。”^[46]

但是如果为期3年的LHC第2轮运行仍一无所获，这又意味着什么呢？这可能会更支持我们的宇宙并非超对称的论点。还有，防止希格斯质量出问题的量子修正的抵消是纯粹巧合微调的结果，而非其他时空对称性的结果。另一种可能性是，LHC即使升级到13TeV后，也还不够强大，不足以产生这些超粒子及暗物质粒子。这些粒子的质量仍然未知。也许它们位于几百GeV附近，也许会比这重千倍。如果后者正确，我们就需要更高能量的对撞机，也许在100TeV的量级，如同中国正在评估的机器，或者CERN正在考虑的一个尺寸大致相当的对撞机。（第5章将进一步介绍这两种机器。）

“LHC有相当的机会产生它们（暗物质粒子），不过100TeV对撞机的机会更大，”艾利斯说。^[47]他认为我们需要足够的耐心和长远的目光，因为我们有许多版本的超对称，它们所允许超粒子质量的范围很宽。他说，希格斯玻色子在提出48年后才被发现，为证实超对称或许也需要这么长甚至更长的时间。^[48]而超对称的想法至少可追溯到1971年。^[49]

在2013年LHC完成第1轮数据采集后，约瑟夫·里肯说：“你第一眼看过去并不一定会发现什么。或许你在看最后一眼时才能发现。没有理论告诉我们说超对称必须是这个样子；我们有一系列、上百万个不同的模型去观察。所以我还不想灰心丧气。”^[50]



约瑟夫·里肯是费米实验室的理论物理学家，研究兴趣包括“超对称、希格斯粒子与其他”。（照片由费米实验室提供）

然而当时有些物理学家已经下结论说，超对称自身不足以解决等级问题。根据 LHC 在 2013 年 2 月之前所观测到的，特别是它没有观测到的，很多人感到超伴子（如果会被发现）也许太重，它产生的量子抵消不足以控制住希格斯质量。虽然超对称仍然可能起重要作用，但似乎还得与其他物理效应结合起来。为了使超对称理论能够成功，也许需要额外的补充，兰道说，而这“额外的补充有可能是额外的维度。”^[51]

额外维度与复合希格斯粒子

如今，物理学家之外的普通人都已习惯于三维空间加一维时间的观念，它们共同构成四维的时空。不过，如果我们的宇宙除了这四维之外还具有隐藏的“额外”维，会有何后果呢？——我们之所以看不见它们，或者是因为它们太小，或者是某种未知的原因阻挡了我们的视野。

日常生活中不乏类似现象。例如，想象在两颗树之间横悬的钢丝。对于试图从一棵树走到另一棵树的人而言，这根钢丝是一维的物体，他／她的运动就被限制在这一维中——向前走或者向后退。一般人在试图通过钢丝走到第二棵树时大抵会这样看。他们大概不会去想，这在一只别无选择的蚂蚁看来是什么样子。蚂蚁当然可以像走钢丝的人那样前行或后退，但它也能朝另一方向移动，比如绕钢丝上的一点转圈，或者螺旋前行后退。对于蚂蚁而言，钢丝是二维物体。不像我们，蚂蚁可以朝两个独立的方向移动。

这个例子展示了隐藏的额外维如何可能存在于自然中。我们人类不知道它，不过是因为我们大而额外维小。而且，额外维可能不止一维，而是很多维。例如，弦论（及其近亲——M 理论）就假设有 6 个（或 7 个）额外的空间维数，它们极其微小，卷曲得极其紧致，以至于我们看不见它们，也不能在其中漫步。不过，要接受我们的宇宙具有一个或更多额外维的可能性，你倒不必笃信弦论。额外维的观念有助于解决等级问题，其解决方式与超对称不同。我们再次提醒，等级问题关乎电弱能标与普朗克能标之间高达 16 位有效数字的巨大差异。等级问题既可被描述成希格斯令人困惑的低质量，又能被描述成引力所表现出的微弱，即两个电子间的引力（如前所述）比其间的电磁作用力弱 10^{43} 倍左右。不过，假若引力不只作用于我们熟知的四维，还作用于额外的维度，又会发生什么呢？对于我们这些受限于四维世界的人而言，它会显得很弱，仅仅是因为我们没有看到它的全部效应。维数越多，

引力被稀释得越厉害，它看上去就越弱。如果我们发现了额外维且引力作用于其中，我们就有可能发现，普朗克能标与电弱能标间的差异并不如预想中巨大。从而希格斯的低质量对于理论家而言就不再是麻烦，等级问题也就不再成其为问题。

但是，如果这些额外维始终隐藏着，我们究竟要怎样追查它们的踪迹呢？特别是，诸如 LHC 及中国所倡议的更强大的后继加速器，在此问题上又有何助益呢？这种机器有可能找到与额外维相关的奇异重粒子，称为卡鲁查－克莱因（或者 KK）粒子。这些假想粒子得名于德国数学家提奥多·卡鲁查（Theodor Kaluza）与瑞典物理学家奥斯卡·克莱因（Oskar Klein）。自 1919 年起，他们发展了一套引力与电磁学的统一理论，其中需要额外维将两种作用力合于一体。若无此额外维，就无法写下适合统一理论的方程。

想象这种粒子如何出现的方式之一是，想象一艘游轮，行驶在奥尔巴尼与布法罗⁵之间狭窄而浅的运河中。^[52]与河道相比，游轮如此巨大，以至于它几乎完全填满了运河。由于挤得很紧，游轮几乎不能朝上下左右移动。就像之前例子中走钢丝的人一样，游轮被限制在一维的路径上，或者朝东驶向奥尔巴尼，或者朝西驶向布法罗。

现在让我们想象一艘稍小的船。当你看见它向布法罗行驶时，你或许没有注意到，它实际上在两维中运行。在朝西行进的同时，它还在两岸之间做很小、快速而稳定的摆动。由于这些横向运动，这艘船就有了额外的动能。另外，这艘船吃水也没有之前的游轮深，因而除了前后左右移动外，它还能上下颠簸。这艘更小、更浅的船因而可在三维而不只是一维中运动，同时它的垂直运动也携带动能。

现在我们将目光从运河中的游轮或小船移向周长 27 千米或 100 千米的地下隧道中近光速运行的粒子。这一赛道的建造者或许会假设在

5 奥尔巴尼与布法罗（又译水牛城）皆为美国纽约州的城市。——译者注

其中加速运行的粒子被限制在一个环上，这个环虽然巨大，但只有一维。现在，如果除了沿巨型跑道运行之外，被撞出的粒子同时还在不可见的维数中运行，在垂直于其行进的方向上做微小而极快的环形运动，会有什么后果呢？这个粒子将会出乎意料地重，因为它沿额外维的持续旋转所携带的动能也贡献到了其质量中。这种粒子还有可能在隐藏的空间中做更快、更高频率的环绕运动，并以规律的倍数（即“量子化”）加速。这样的粒子将携带更多动量，在我们看来就更重。

到目前为止实验中没有发现任何呈现这种模式的信号或粒子。然而如果有所发现，如果能够在 LHC 或下一代对撞机上探测到大量的此类奇异粒子，它们彼此相似但质量有规律地递增，物理学家就很有可能目睹了额外维的第一个线索，除了化解等级问题，这本身也将导致物理学革命。（科幻作家们作为额外维的忠实信徒，或许也能从中为其作品找到一些证据。）

在这些想法中的一种能够明确地拟合数据并扫清所有疑点之前，理论家总有事可做。他们得不停地提出更多新想法，直到其中之一能奏效。对于恼人的希格斯质量问题，还有一种解决方式，即假设希格斯是一种复合粒子，带有内部结构，如同作为复合粒子的强子（比如质子和中子）。这种猜测目前尚无证据支持，但如果被确证，希格斯就不再是基本粒子。其质量的来源就如同质子质量的来源，来自各组分的质量与束缚这些组分的结合能。那些使基本希格斯粒子的质量抬升的量子效应，不会作用于这种复杂的希格斯玻色子。因而在这幅图景中，就无须担心希格斯的轻质量，从而全部危机得以化解。

探索复合希格斯的方式之一是测量希格斯玻色子的成对产生。“LHC 做不到这一点，因为产生率太低”，而这类现象又太稀少。“但一个 100TeV 的机器就可以，”斯特拉斯勒说。这就给我们提供了观测希格斯如何自作用的机会，它也有助于判断 2012 年发现的希格斯玻色子究竟是最简单的希格斯粒子，抑或具有隐藏的内部结构。^[53]

例如，3 个希格斯粒子可以相互作用。阿卡尼－哈梅德说，这是我们前所未见的现象。使这种作用发生的途径之一是，两个希格斯对撞并产生另一个希格斯。这个新产生的希格斯很可能是更重的虚粒子，它会很快地衰变成其他两个粒子（如 W、Z 玻色子）。研究这类“三希格斯”相互作用对于理解希格斯是点状粒子还是具有可分解的内部结构极为重要。阿卡尼－哈梅德说：“这绝对是 100TeV 机器所能做的关键测量。”^[54]

现有理论假设希格斯粒子是点状的，因而如果出现了反对它的证据，即希格斯由更小的部分构成，这将会震撼物理学界。如同阿卡尼－哈梅德所说，“确实把洋葱拨开了。”^[55]这不仅会改变我们对近来发现的希格斯玻色子的看法，同时也提示，其他被认为是自然基本要素的粒子也许同样有更小的组成部分。解释这些现象就需要新理论，而粒子物理学也将焕然一新。借用凯恩的话，这也是科学进步的方式。

新一代对撞机

可以看到，希格斯质量疑难将我们带向这样的探寻，而我们已有多种方式解决它。“它可以是超对称或额外维，或者其他什么模型，比如复合希格斯，”王贻芳说。“我们最终需要这些想法的其中之一，或它们的某种结合，或者尚未发明的某种想法。我们并不知道这其中是否有正确选项，以及哪个选项是正确的。这就是我们需要新加速器告诉我们向何处去的原因。”^[56]当然，王对于这一设备的最佳选址已有一些想法。

当然，建造这一规模的设备，需要巨大的投资，很可能多于 100 亿美元。论证这样的费用并不容易，因为在这种有风险的探索中无法保证发现什么，特别是对于物理学中诸如暗物质、质量尺度起源这种大问题。没人会在这个当口信心十足地说：修建这个机器，我们肯定能发现 x、y、z。我们仅能保证的是，如果要在最基本的层面理解我们的宇宙，我

我们就必须不停地探索，我们不得不继续在更高能量和更小距离尺度下审查自然。

对于下一代加速器上会出现什么，哈佛的理论家马修·施瓦茨（Matthew Schwartz）说：“我们不知道该期待什么，但是如果我们不建造这台机器就永远不会知道。而我们一旦知道，我们就不用再看一遍。”^[57]

马丁努斯·韦尔特曼因其与杰拉德·埃图夫特对标准模型的贡献而分享 1999 年的诺贝尔物理学奖。他认为除此之外别无选择，因为他相信，对于亚原子尺度的探索应该永不停止，而且很可能也从不会停止。韦尔特曼坚称：“探索未知是人类活动的一部分。试想，如果我们决定不再建造任何粒子对撞机，50 年之后我们再共聚一堂面面相觑，你难道不觉得，在某一时刻会有人说：我们不应该至少再看一眼吗？”^[58]



马丁努斯·韦尔特曼（图示）与他以前的学生杰拉德·埃图夫特因“阐明了电弱相互作用的量子结构”而分享 1999 年的诺贝尔物理学奖。（照片由 CERN 提供）

这种方法在过去总是成功的。阿卡尼－哈梅德说：“在上个世纪，将观察的尺度每缩小 10 倍，都使我们能够更深刻地理解世界运作的方

式。绝对没有理由相信这一进程会止于当下。”对他而言,未来十分清楚:我们需要建造下一代巨型加速器,将质子对撞的能量提升到 LHC 的 10 倍,以探索前所未及的更小距离尺度。^[59]

假如经过所有努力后仍未发现新粒子,将非常令人震惊,因为它提示,如此低的希格斯质量并没有简单而“自然”的解释。“在过去若干世纪中,自然性的概念一直是物理学的指导原则,”高等研究院的纳坦·塞伯格(Nathan Seiberg)声称,“如果自然性失效,我们就得接受参数仅仅如其所是的观念。”这些参数为何如此的根本原因也就无从得知。他希望自然性原则屹立不倒。如果目睹了其失效的重大时刻,理论家就得将一切推倒重来。^[60]

这种毫无发现的局面也是对还原论方法的沉重打击。根据还原论,如果在某个特定尺度上出现了我们不理解的事情,那么到更小的距离尺度就有可能理解它。数百年来,还原主义与自然主义一直引领物理学驶向胜利。它们一旦失效,就会引发重大的范式更换。^[61]

当前,对于自然界选择哪条道路我们只能猜测。但我们已确认了最有可能得到回答的策略,而且它相当明显:我们需要建造一台大型机器,也许在 100TeV 的量级,它当然比我们组装过的任何机器都大。这需要时间,需要至少几十年的研究、开发、规划,以及最终的建造。静坐以待只会两手空空,尽早行动乃成功良策。

参考文献

- [1] Nima Arkani-Hamed. “Beyond the Standard Model theory.” *Physica Scripta*. T158 (December 2013), pp. 014023-24.
- [2] John Ellis. “The Beautiful Physics of LHC Run 2.” *Proceedings of Science*. December 8, 2014. <http://arxiv.org/abs/1412.2666>.
- [3] Joseph Incandela. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.

- [4] Steven Weinberg. “What We Do and Don’t Know.” *New York Review of Books*. November 7, 2013. <http://www.nybooks.com/articles/archives/2013/nov/07/physics-what-we-do-and-dont-know/>.
- [5] Sergio Bertolucci. The Second Annual Large Hadron Collider Physics Conference. Columbia University, June 6, 2014.
- [6] Matt Strassler. “Why the Higgs Particle Matters.” *Of Particular Significance* (blog). July 2, 2012. <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/the-higgs-particle/why-the-higgs-particle-matters/>.
- [7] G. Aad, *et al.* “Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in pp collisions.” The Atlas and CMS Collaborations. *arXiv:1503.07589v1*. March 26, 2015.
- [8] CERN Press Office. “LHC experiments join forces to zoom in on the Higgs boson.” *CERN Press Release*. March 17, 2015. <http://press.web.cern.ch/press-releases/2015/03/lhc-experiments-join-forces-zoom-higgs-boson>.
- [9] “China super-collider plan for ‘God particle’ studies.” *ShanghaiDaily.com*. February 27, 2014. <http://www.shanghaidaily.com/national/China-super-collider-plan-for-God-particle-studies/shdaily.shtml>.
- [10] Nima Arkani-Hamed, Institute of Advanced Studies (interview in Cambridge, Mass.). December 2, 2014.
- [11] “LHC experiments are back in business at a record new energy.” *CERN Press Office* (online). June 3, 2015. <http://press.web.cern.ch/press-releases/2015/06/lhc-experiments-are-back-business-new-record-energy>.
- [12] Elizabeth Gibney. “LHC 2.0.” *Nature*. 519 (March 12, 2015), p. 142.
- [13] Ashley Wrenners-Herron and Kathryn Jepson. “What’s Next for the Large Hadron Collider?” *Symmetry* (online). February 4, 2013. <http://www.symmetrymagazine.org/article/february-2013/whats-next-for-the-large-hadron-collider>.
- [14] Luciano Maiani. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.

- [15] Nima Arkani-Hamed. The Second Annual Large Hadron Collider Physics Conference. Columbia University. June 6, 2014.
- [16] Rebecca Boyle. “CERN Physicists to Build Longest-Ever Linear Particle Accelerator.” *Popular Science* (online). July 19, 2010. <http://www.popsci.com/science/article/2010-07/particle-physicists-playing-it-straight-longest-ever-linear-accelerator>.
- [17] R.A. “The Q&A: Brian Greene – Life after the Higgs.” *The Economist* (online). July 19, 2012. <http://www.economist.com/blogs/babbage/2012/07/qa-brian-greene>.
- [18] Yifang Wang, IHEP (interview with the author at Harvard University), December 2, 2014.
- [19] Lisa Randall. *Warped Passages*. (New York, Ecco, 2005), p. 253.
- [20] Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos, and Georgi Dvali. “The Universe’s Unseen Dimensions.” *Scientific American*. August 2000, p. 62.
- [21] Lisa Randall. *Higgs Discovery*. (New York, Ecco, 2013), p. 94.
- [22] Lisa Randall. *Warped Passages*. (New York, Ecco, 2005), pp. 243, 250.
- [23] Don Lincoln. *The Large Hadron Collider*. (Baltimore, Johns Hopkins University Press, 2014), p. 167.
- [24] Edward Witten. “Matter matters: why we need supercolliders.” *The New Republic*. December 29, 1997, pp. 16-17.
- [25] Gordon Kane. *Supersymmetry*, (Cambridge, Mass, Perseus Publishing, 2000), pp. 5-6.
- [26] Dan Hooper. *Nature’s Blueprint*. (New York, Harper Collins, 2008), pp. 109-110.
- [27] Gordon Kane. *Supersymmetry*, (Cambridge, Mass, Perseus Publishing, 2000), p. 68.
- [28] John Ellis, CERN (telephone interview with author), January 5, 2015.

- [29] Joseph Lykken and Maria Spiropulu. “Supersymmetry and the Crisis in Physics.” *Scientific American*. May 2014, p. 34-39.
- [30] Gordon Kane. *Supersymmetry*, (Cambridge, Mass, Perseus Publishing, 2000), pp. 55-56.
- [31] John Ellis (telephone interview with author), January 5, 2015.
- [32] Dan Hooper. *Nature’s Blueprint*. (New York, Harper Collins, 2008), p. 193.
- [33] M. E. Peskin. “Will there be Supersymmetry at the ILC?” (talk presented at CERN workshop, *Implications of LHC results for TeV-scale physics*. July 2012.
- [34] Michael Peskin, SLAC (e-mail communication with the author), May 25, 2015.
- [35] Matt Strassler, Harvard University (interview with the author at Harvard University), December 16, 2014.
- [36] Masahiro Morii, Harvard University (interview with the author at Harvard University), December 19, 2014.
- [37] Jill Sakai. “Heart of the Matter.” *University of Wisconsin-Madison News* (online). <http://www.news.wisc.edu/on-wisconsin/heart-of-the-matter/>.
- [38] Masahiro Morii (interview with the author at Harvard University), December 19, 2014.
- [39] Alvin Powell. “Back into the dark.” *Harvard Gazette*. December 16, 2014. <http://news.harvard.edu/gazette/story/2014/12/back-into-the-dark/>.
- [40] Nima Arkani-Hamed (interview with the author in Cambridge, Mass.). December 2, 2014.
- [41] Nima Arkani-Hamed (interview with the author at IHEP in Beijing). August 8, 2014.

- [42] Nima Arkani-Hamed. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [43] Edward Witten. “Foreword.” appearing in *Supersymmetry* by Gordon Kane, (Cambridge, Mass, Perseus Publishing, 2000), p. xiii.
- [44] Frank Close. *The Infinity Puzzle*. (New York: Basic Books, 201), p. 348.
- [45] Lisa Randall. *Warped Passages*. (New York, Ecco, 2005), p. 258.
- [46] Edward Witten. “Foreword.” appearing in *Supersymmetry* by Gordon Kane, (Cambridge, Mass, Perseus Publishing, 2000), p. xiii.
- [47] John Ellis (telephone interview with author), January 5, 2015.
- [48] John Ellis. “The Beautiful Physics of LHC Run 2.” *Proceedings of Science*. December 8, 2014. <http://arxiv.org/abs/1412.2666>.
- [49] Y.A. Golfand and E.P. Likhtman. “Extension of Algebra of Poincare Group Generators and Violation of P Invariance.” *JETP Letters*. 13 (1971), pp. 323-326.
P. Ramond, “Dual theory for free fermions.” *Physical Review D*, 3 (1971), pp. 2415-2418.
- [50] Corey S. Powell. “After the Higgs Boson: A Preview of Tomorrow’s Radical Physics.” *Discover* (online). October 11, 2013. <http://blogs.discovermagazine.com/outthere/2013/10/11/what-comes-after-the-higgs/>.
- [51] Lisa Randall. *Warped Passages*. (New York, Ecco, 2005), p. 275
- [52] Matt Strassler. “What is an ‘Extra’ Dimension? Some Examples.” *Of Particular Significance* (blog). January 10, 2012. <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/some-speculative-theoretical-ideas-for-the-lhc/extra-dimensions/extra-dimensions-how-to-think-about-them/what-is-an-extra-dimension-an-example/>.
- [53] Matt Strassler (interview with the author at Harvard University). December 16, 2014.

- [54] Nima Arkani-Hamed (interview with the author in Cambridge, Mass.). April 1, 2015.
- [55] Nima Arkani-Hamed (interview with the author in Cambridge, Mass.). December 2, 2014.
- [56] Yifang Wang (interview with the author at Harvard University), December 2, 2014.
- [57] Matthew Schwartz, Harvard University (interview with the author at Harvard University), December 19, 2014.
- [58] Matthew Chalmers. “Q&A Martinus Veltman: Coming to terms with the Higgs.” *Nature*. 490 (October 11, 2012), p. 511.
- [59] Nima Arkani-Hamed. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [60] Nathan Seiberg, Institute of Advanced Studies (telephone interview with author), March 31, 2015.
- [61] Nima Arkani-Hamed (interview with the author in Cambridge, Mass.). April 1, 2015.

第 4 章

中国在舞台中央

目前利用“巨型对撞机”探索新物理的想法正如前章所述。不过在最乐观的情况下，将其付诸实现也会超出 10 年的工期。虽然中国的物理学研究在各方面都曾落后于西方，有些领域甚至落后数十年，但中国正努力弥补这些差距。当然，这不会在一夜之间完成。在此期间，海内外的中国研究人员正为揭示超越标准模型的新规律、发现新粒子而辛勤工作。他们千方百计地实现这一目标，身影遍及世界各地。

CMB 观测与宇宙暴胀的遗迹

就拿南极来说，郭兆林正在这里参与领导探测源自宇宙大爆炸的引力波。来自台湾的郭兆林是斯坦福的物理学家，也是“河外宇宙偏振背景成像 3”（BICEP3）实验的项目负责人。实验基地就在阿蒙森—斯科特南极站。在 BICEP3 望远镜与探测器的研发中，郭兆林带领的斯坦福团队发挥了核心作用。他还为 BICEP3 的上一代望远镜——BICEP2 设计了探测器。2014 年春，郭兆林与 BICEP2 的其他负责人认为他们辨认到了来自宇宙诞生之初远小于一秒内产生的引力波信号。他们所探测到的信号具有一种特别的模式，它出现在称为宇宙微波背景（CMB）的大爆炸遗迹中，在 15 年前就已被预言。

如果真的如此，这将是首个支持宇宙暴胀的直接证据。宇宙暴胀是一段瞬间的爆炸性膨胀，有人认为，它驱动了宇宙大爆炸。然而，

普朗克空间望远镜随后公开的数据，以及普朗克与 BICEP2 科学家的联合分析表明，南极望远镜所看到的这种效应很大程度上来自我们星系中的尘埃的影响，而非来自宇宙的原初时刻。

BICEP3 作为新一代望远镜将会在不同波段做观测，因而可降低尘埃的干扰，从而有更大机会目击宇宙分娩的阵痛，其能量尺度比 LHC 这样的人造加速器高万亿倍。探测引力波这一新的领域之所以在近年来成为可能，很大程度上归功于郭兆林和他的 BICEP 合作者所发展的技术。用郭兆林的话说，这带来了“新发现的机会。它使研究者心怀希望：新物理终将被我们发现。”这里的新物理代表了当下的主流观点。^[1]

与此同时，BICEP 团队的另一些成员正在北半球寻找地点，以期对 CMB 做互补的测量。他们认为西藏西部的阿里地区已有可行的选项。工作于 MIT 与中科院高能物理研究所的天体物理学家苏萌领导了这一行动。生于中国太原的苏萌也是 BICEP 成员。通过在南极、智利（阿塔卡马宇宙学望远镜），以及西藏的观测，苏萌说，“你就能通过地面望远镜覆盖整个 CMB 天空。如果你从南极探测到貌似来自原初宇宙的信号，同时用不同的设备从西藏在反方向上也看到类似的信号，你就更有信心宣称发现了暴胀与引力波。”对于一项极端重大的发现，这提供了重要的交叉检验。^[2]

对于 CMB 观测而言，阿里以其 5100 多米的高海拔而备受青睐。因为在此处观测所需穿越的大气层相对稀薄，也因为喜马拉雅山脉阻挡了向青藏高原吹来的水汽，这里极为干燥。这些因素创造了天文学家所说的“好的视宁度”。该处已有几台小规模的光学望远镜，说明其基础设施已经就位，包括道路交通、电力及建筑。在此进行实验无须大规模的基础建设，因而其花费相对较少，在一两千万美元左右。

高能所正支持该项目，并会提供一些种子基金。不过高能所基本上不可能单独资助整个实验。在开始筹集资金之前，苏萌计划在 2015 年年底前与几位 CMB 权威一道赴阿里考察，其中包括哈佛大学的约翰科

瓦克（John Kovac）与 BICEP 实验项目负责人、明尼苏达大学的克莱姆·普莱克（Clem Pryke），以及芝加哥大学的约翰·卡尔斯特罗姆（John Carlstrom）。此行的目标很简单：考察西藏的台址对于 CMB 天文学来说究竟有多好。如果其优越性果如这几位专家所预想，那么苏萌就要开足马力尽其所能，利用各种资源来推动进行这项具有潜在宇宙学意义的实验。^[3]

锦屏地下实验室与暗物质探测

西藏位于世界最高最辽阔的高原，被称为“世界屋脊”。与此同时，低海拔地区也在进行着有趣的科学项目。位于中国四川省偏远地区的锦屏地下实验室，深藏于 2400 米的岩石层之下，被《自然》杂志称为世界最深的实验室。锦屏是“粒子与天体物理氙”实验（缩写为 PandaX）的基地，该实验旨在从地球深处寻找暗物质。^[4]该实验室深埋于地下，相比于同类暗物质搜寻实验，诸如运行在意大利大萨索山隧道中的 Xenon100 实验，以及在美国南达科他州金矿的原址上运行的“大型地下氙”（LUX）实验，该实验室上面覆盖的很厚的大理岩层使其能够更好地隔离背景噪声。PandaX 合作组成立于 2010 年，当时锦屏地下实验室尚未开放，经过数年发展，如今拥有 40 多位科学家，他们中多数来自中国，个别来自美国。“我们几乎白手起家，”该合作组的发言人、上海交通大学的季向东说，“我们以前既没有研究组，也没有设备，什么都没有。”然而正如《科学》杂志在 2014 年所报道，“PandaX 团队正快速追赶世界水平。”^[5]

与同类搜寻实验一样，PandaX 旨在探测并最终描述据信占宇宙物质 84% 以上的暗物质。该合作组的一篇论文描述了其探测器在调试阶段的表现。其中写道：“虽然……天体物理的间接观测使我们确信暗物质存在，但它尚未被直接观测到”；“粒子物理标准模型非常成功地解释了普通物质，但它既不能解释暗物质存在，也不能解释其性质。”^[6]

PandaX、Xenon100 与 LUX 都在试图寻找一类被称为 WIMP 的新粒子。WIMP 是“弱作用重粒子”的缩写¹，物理学家相信暗物质粒子应当具有弱作用重粒子的性质。这类探索的共同假设是，我们的星系有可能浸没于一团未曾发现的粒子中，它们未被发现仅仅是因为其与其他物质几乎没有相互作用。捕捉这种粒子的可能方式之一是，在地下深处蓄积一种特别致密的物质作为这种粒子的“陷阱”。在这里，物理学家可以屏蔽背景辐射与其他潜在的干扰信号，他们同时希望暗物质将有机会与靶原子撞击。目前受到青睐的靶子由液氙组成，通过低温学方法，物理学家将其降温至零下 100 摄氏度，并置于地下深处^[7]。维持冷却的探测器保证了其中的氙原子几乎不运动。这样一来就更容易分辨其中的原子与暗物质粒子撞击而产生的扰动。当 WIMP 罕见地撞到某个氙原子核时，该原子核就会在密度约 3 倍于水的致密介质中穿行，同时发射一束闪光。被撞击的原子也会释放出游离的电子，继而产生次级光闪，并被环绕在探测器周围的传感器捕捉到。

据季向东介绍，PandaX 的优点之一是其规模可被快速扩大。事实上，他与同事正计划在即将开始的第 2 轮实验中将最初的 120 千克^[8]液氙探测器扩大 20 倍，达到 2400 千克。这将显著提高该设备观察到 WIMP 信号的机会。^[9]一旦经费落实，季向东与同事们就能大步走向他们最初为这次探险所制定的目标。“我们想要展示，在中国也能进行世界级的暗物质研究，”他说。^[10]当然，如果能在其液氙陷阱中俘获穿行而过的暗物质，就将导致更为重大的结果。PandaX 合作组成员说，这一发现将同时对“宇宙学、天文学与粒子物理学产生深远影响。”^[11]

1 这里的“弱作用”单纯指相互作用的强度很弱，它与作为基本相互作用之一的“弱作用”并无必然关系。——译者注

阿尔法磁谱仪的太空使命

与此同时，在地球上空 350 千米的高度，另一个平行的空间实验正在进行。由国际空间站搭载的阿尔法磁谱仪（AMS）每 90 分钟绕行地球一周，它正在筛查由恒星爆炸等原因喷出的宇宙射线。通过研究这些高能粒子射线，人们希望能够获得暗物质，或许还有其他奇异物理的知识。来自 16 个国家 56 个研究机构的 600 多位研究者，在 MIT 物理学家、诺贝尔奖得主丁肇中的领导下参与了这一巨大的合作项目。丁肇中在中国大陆与台湾成长。由于 20 世纪 30 与 40 年代中国与日本持续的战争，他的家庭不得不频繁迁移。他在童年时期因此几乎无法正常上学，只能通过自学了解那些伟大的科学家——伊萨克·牛顿（Isaac Newton）、迈克尔·法拉第（Michael Faraday），还有詹姆斯·克拉克·麦克斯韦。^[12]



阿尔法磁谱仪 2，由丁肇中构思并开展的实验项目，搭载于国际空间站上。（照片由美国国家航空航天局提供）

丁肇中从 1994 年开始推进 AMS，那时正是超导超级对撞机（SSC）项目取消的第二年。他推测，如果无法建造一台足以产生暗物质粒子的

强大对撞机，我们或许可以远离地面上的各种干扰，去太空中进行研究，据推测这些粒子在太空中会大量存在。AMS 的探测器与粒子加速器所使用的典型探测器原理相同。它有一块磁铁，使飞入其中的粒子偏转。只不过这些粒子来自宇宙射线，而非人工制造的对撞。其偏转程度取决于粒子的质量，而偏转方向（如之前的章节所讨论）取决于其电荷。由此，该设备可追踪到粒子速度、质量与电荷的线索。综合这些线索，就有可能辨认出该粒子。在某些方面，AMS 与 PandaX 之类的实验也有类似之处，只不过 AMS 的测量在外层空间进行，从而可避免地球上的干扰。在地球之上约 400 千米的高空中，AMS 得以检测未受大气干扰的原始宇宙射线，其中某些射线已在宇宙空间中未受干扰地穿行了数百万年之久。

据报道，这个 7.5 吨重的磁谱仪耗资 15 亿 ~20 亿美元，其中大部分都是丁肇中自己筹集的。在他开始此项目的工作 17 年之后，这个沉重的设备在 2011 年 5 月——丁肇中 75 岁时，由奋进号航天飞机送上空间站，这是该航天飞机生涯中的最后一次航行。若不是他钢铁般的意志与强力的手腕，这次发射本来绝无可能。在众人眼中，丁肇中勤奋执着，为达目标百折不挠。他曾在其一项提议被回绝后，对美国能源部说：“我拒绝你的拒绝。”^[13]

2003 年，哥伦比亚号航天飞机爆炸，7 名宇航员全部遇难。原定在 2005 年运送 AMS 升空的航天飞机因此被取消。在丁肇中不懈的游说下，参众两院终于投票批准，在航天飞机项目永久终止前，另增一次额外飞行任务将 AMS 送上轨道。“要不是 [丁肇中] 绝不放弃的精神，我们就不会有它，”前美国参议员凯·贝莉·哈奇逊 (Kay Bailey Hutchison) 说。她曾帮助该项目获得了经费。^[14]

就在 2010 年仪器计划升空之前，丁肇中决定移去该设备中心区域强大的超导磁铁，代之以永磁体。后者较超导磁体稍弱，但可保证该实验运行更多年。这最后一刻的改动又导致了额外的延迟，错过了另

一次飞行。不过 AMS 最终于 2011 年 5 月 16 日从肯尼迪航天中心发射升空，在数日后登上国际空间站，并很快开始了数据收集。

到 2014 年，该设备已收集了 540 亿个宇宙射线事件，并对其中 410 亿个粒子做了仔细审查。^[15]AMS 以空前的精度研究了其所接收的宇宙射线，同时获得了前所未有的能量尺度的数据。到目前为止其所分析的粒子能量已达 500GeV，^[16]AMS 计划将这一能量在随后若干年内升高到 1000GeV（也即 1TeV）。^[17]

研究者对不同能量区间中收集的电子与正电子的数量差特别感兴趣。这背后的道理在于，许多理论模型（它们中大多数都涉及超对称）认为暗物质粒子也是其自身的反粒子。因此，如果两个暗物质粒子或者说两个 WIMP 对撞，就会湮灭或者说消失，与此同时产生其他粒子，如光子、电子与正电子，以及质子与反质子。WIMP 湮灭产生的粒子看上去很像普通的宇宙射线，只不过它们出现的能量更高，同时具有不同的相对丰度。

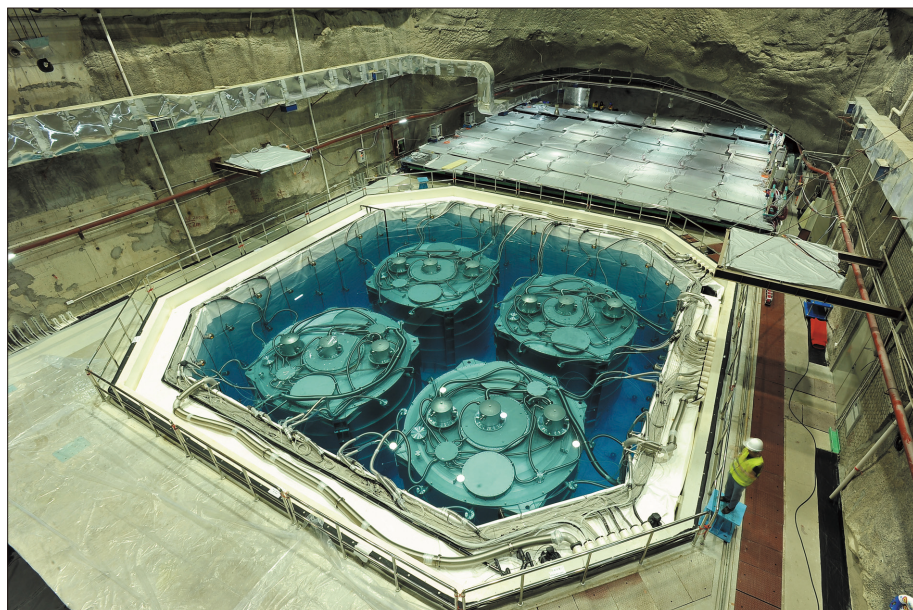
在某个特定的能量下看见正电子与电子数量之比上升，同时在此能量看见该比例突降，就有可能是暗物质无可争辩的信号。“它们〔正电子〕下降的方式会告诉你一切，”丁肇中提到。^[18]AMS 团队观察到正电子数在高于 275GeV 时出现下降，但他们需要更仔细的测量以确定该下降的速度。^[19]这将能提供进一步线索，以指明此处观察到的正电子究竟来自暗物质，还是来自更常见的天体物理源，比如被称为脉冲星的旋转中子星的发射。丁肇中说，这是暗物质可能的迹象，“但绝不是——一个证明。”^[20]

2015 年 4 月，AMS 团队发布的公告讨论了在很宽能量范围内的宇宙射线中对反质子与质子之比的测量。这一结果如同正电子与电子之比的结果，似乎与它们来自寻常宇宙射线的解释相冲突，但是已有数据尚不足以将这一发现完全归结于暗物质。^[21]随着数据量的进一步积累，这一切将更为清楚。如果一切顺利，该实验可持续到 2020 年，甚

至可能持续到 2028 年。^[22] 没有人知道最终会出现什么，因为我们正在开启未曾探索过的全新领域的一扇大门，丁肇中说。这位一丝不苟的负责人密切监视着该实验的每个方面。“我最重要的职责是确保该仪器正确工作。我们不知道将会看见什么，但你必须确保你所看见的东西是正确的。”^[23]

大亚湾与 JUNO 中微子实验

在 AMS 的决定性证据还未到来时，在中国东南部，位于香港东北约 55 千米的大亚湾，另一个独立的实验已经取得了重要结果。这项实验的焦点是中微子，它有 3 种，或称 3 种“味道”：电子型、 μ 子型，以及 τ 子型。在各类衰变过程中，它们分别与标准模型中的另 3 种（荷电的）轻子相关，即电子、 μ 子与 τ 子。由中国和美国的团队领导的一个国际合作组正在大亚湾探索种种中微子之谜，包括其质量（它们尚未被精确测定），以及它们能够相互转换的怪异性质。



大亚湾反应堆中微子实验的地下反中微子探测器（照片由高能所提供）

作为宇宙大爆炸期间大量产生的幽灵物种，中微子在宇宙中的丰度位居第二，仅次于光子，数量多于所有其他形式的物质。^[24]它们以近光速穿越空间，穿透其路径上的一切，极少有例外。原工作于普林斯顿高等研究院的已故天体物理学家约翰·巴考尔（John Bahcall）说，“每秒钟大约有一千亿来自太阳的中微子穿过你的拇指指甲，但你感觉不到它们，因为它们与物质发生相互作用那么稀少而且极其微弱”。如果所有这些太阳中微子都继续下行穿过地球，那么其中只有大约千亿分之一将会与地球内的物质以任何可能的方式发生相互作用。^[25]

标准模型的最初版本认为中微子无质量，然而自20世纪90年代末以来，各种证据显示这些粒子有微小的质量，或许相当于电子质量的百万分之一。这一发现对理论家提出了挑战：他们正在寻找修改或“扩展”标准模型的最佳方法。斯蒂芬·温伯格说：“标准模型之后，无论下一个更令人满意的模型是什么，它很可能都必须蕴含中微子微小的质量。”^[26]

虽然我们还不知道中微子质量的来源究竟是希格斯机制还是其他的某种机制，但中微子存在质量与它能够规律地相互转换这一事实密切相关。2001年，人们记录到这种现象，并用以解释“太阳中微子之谜”。这个难题是指，对于从太阳出发到达地球的电子中微子，实际所见只有理论预言的1/3。这项发现来自加拿大安大略省萨德伯里的太阳中微子实验室。“对太阳中微子丢失之谜的解释是，中微子实际并未丢失，”巴考尔解释说，“原先没有统计在内的中微子已经从电子中微子转变成了更难探测的 μ 中微子与 τ 中微子。”^[27]

中微子振荡是一种量子现象——其前提假设是，给定“味道”的中微子并非独立而不可改变的粒子。实际上，它是不同质量态的组合，因而不可避免地会随着时间流逝从一种变成另一种，然后再变回来。作为类比，参与大亚湾实验的香港中文大学物理学家朱明中（Ming-Chung Chu）建议想象一个缓慢旋转的硬币。“你有时看到正面，有时看到反面，

有时可能两者都看到一点，”他说，“这就像中微子振荡，虽然更好的类比应该是一个三面的硬币，”如果有这种东西的话。^[28]

哈佛的马特·斯特拉斯勒提出了另一个例子。他说，一条指向东北方向的路“在一定程度上既是朝北的也是朝东的，但你不能说它就是朝北或者朝东。与此类似，朝北的路可视作朝东北的路与朝西北的路的混合。中微子的情形与此相同。”三味中微子的每一味都包含了三种可能质量态的“确定但各不相同的混合”。这种混合并非一成不变，而是会经历动力学的演化，从而其身份也会发生周期性的变化。^[29]

振荡的时长也即周期，取决于不同味道的质量差。不同味道的质量差越小，周期越长。²若完全无质量差，周期就无限长，因而振荡也就不会发生。人们已经在所有三种味道的中微子间观察到了振荡，这就说明电子中微子、 μ 中微子与 τ 中微子三者的质量互不相同。若果真如此，那么这三者中至少就有两者的质量非零。因而，至少有两种中微子有质量，或许三种都有。这一发现与标准模型最初的构想相悖。

由于中微子太轻了，物理学家尚未找到直接测量其质量的方法。但我们仍然可以通过测量中微子振荡获得其质量的信息。大亚湾的研究者尤其关注从一种味道中微子转变为另一味道的概率，刻画这一转变的参数称为混合角。当前，定量描述两种转换过程发生率的两个混合角已被确定。但是描述电子中微子向 μ 中微子或 τ 中微子转变的第三个混合角，称为 θ_{13} ，尚未被确切地测量到，甚至还没有被确定为非零。“重要的未决问题是，三种中微子究竟是真的以三种方式混合，还是说我们所见的只是两种独立成对的混合，”伦敦大学学院物理系主任

2 更准确的说法是，振荡的周期取决于具有确定质量的中微子态之间的质量差。与此类似，当下文中出现“3味中微子的质量平方差”时，均应理解为“具有确定质量的中微子态之间的质量平方差”。——译者注

姜·巴特沃思（Jon Butterworth）提到。^[30]这正是大亚湾实验所要回答的问题。

该实验的选址靠近大亚湾核电站与岭澳核电站的6个核反应堆。这些反应堆可产生数目庞大的反中微子，其产率在每秒 10^{21} 个以上。^[31]反中微子与中微子有相同的质量、（零）电荷、自旋，因而在实验中可用于研究物理学家为中微子提出的振荡与混合角问题。（不过中微子的振荡方式有可能与反中微子略微不同，而物理学家也渴望研究这种可能性。）

为了准备中微子的实验室，毋宁说反中微子的实验室，需要在附近山坡的岩层中爆破出3千多米长的隧道，以及3个大而深的实验厅，以容纳8个中微子探测器。挖掘工作于2010年底结束，翌年，探测器被安置于几百米的花岗岩层下，以有效阻挡宇宙线的干扰。每个反中微子探测器都是重达110吨的圆柱体，其核心的容器蓄积有20吨含有重金属钆的液态“闪烁体”。当反中微子与该液体中的质子发生作用时，会产生一个正电子与一个中子，而由此释放的能量将产生一次光闪。排列在探测器外围的光电倍增管就此记录下伴有反中微子出现的光闪。这些探测器被进一步浸没在纯水池中，以更好地阻挡宇宙射线与周围岩石的天然射线。

其中2个大厅各能容纳2个探测器，距核电站约250米；而第3个大厅可容纳另外4个探测器，距反应堆约2千米。在这样的位置，电子型反中微子“消失”的概率达到理论上的最大值。研究者所采取的策略相当直接：他们的探测器只对电子型反中微子敏感，看不见 μ 型反中微子和 τ 型反中微子。因而他们统计靠近反应堆的第1组探测器，以及远端的探测器所记录电子反中微子。他们同时计算，假设没有反中微子振荡时远端探测器应当记录的数目。有了这些数目，大亚湾的物理学家就能确定有多少电子反中微子已经转换成探测器看不见的另

一种反中微子。由此，他们就能以空前的精度计算第 3 个，也就是最后一个混合角。

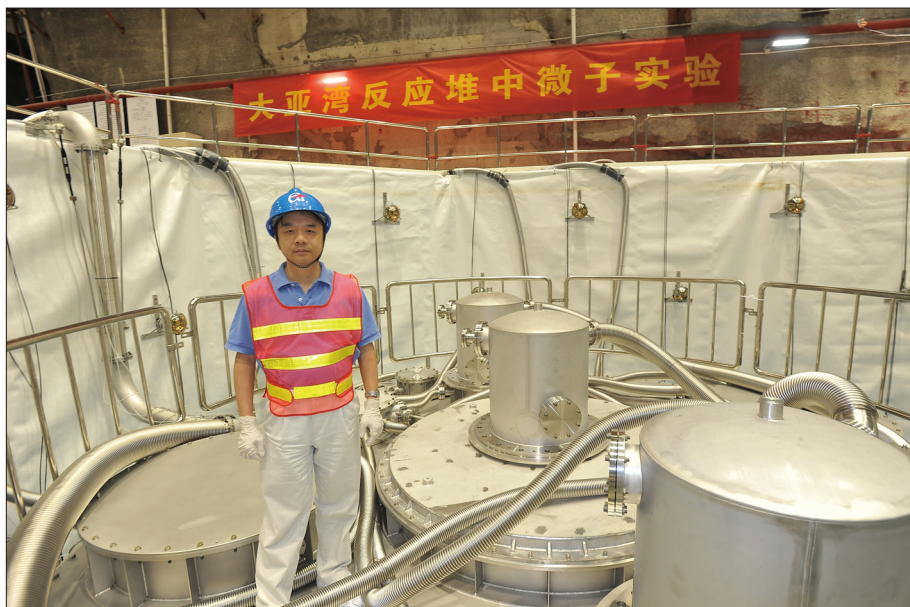
“在降低系统误差方面，我们比以前的实验强 10 倍，”高能所的王贻芳说。他与加州大学伯克利分校、劳伦斯伯克利国家实验室的物理学家陆锦标（Kam-Biu Luk）共同领导了该实验。^[32]陆与王领导的合作组在 2012 年 3 月 8 日报告了他们的发现。他们首次以显著的统计度确定了 θ_{13} ，该测量来自 8 个探测器中最终在地下安装的 6 个。这一发现就像包围该实验设备的花岗岩一样牢固，它具有 5.2σ 的精度或称置信度，这意味着该结果并非是侥幸的偶然，因为其概率只有几百万分之一。一个月后，韩国的中微子振荡反应堆实验（RENO）宣布了类似的结果，进一步证实了该发现。

大亚湾实验确认混合角 θ_{13} 非零，显示了中微子实际上有 3 种振荡方式，而且此混合角比预期值更大。这对于一些物理学家来说无疑是好消息，因为他们希望中微子有助于回答最大的秘密之一：据推测，我们的宇宙始于等量的物质与反物质，但如今看来几乎只有物质而无反物质。

对此问题的解释，至少是部分解释，是由于物质与反物质之间的微妙区别。如果这种区别产生，就会使电荷 - 宇称（CP）对称性破缺。这种假设存在于物质与反物质之间的对称性断言——物质与反物质粒子可互换，在各种物理过程中它们的相互替换不会影响物理结果。

CP 破缺的首个确切证据来自 1964 年詹姆斯·克罗宁（James Cronin）与瓦尔·费奇（Val Fitch）在布鲁克海文国家实验室完成的实验。克罗宁与费奇观察了 K 子，也称为 K 介子，即由一对夸克和反夸克构成的短寿命粒子。两位科学家所关注的中性 K 介子具有一种奇怪的性质：它们在其物质与反物质形态间不停地转换。然而，克罗宁与费奇观察到，这种转换的概率在一来一去的过程中并不相同，他们因此发现而荣获

1980 年的诺贝尔奖。他们所发现的这种 CP 破缺被称为“间接”的，因为它涉及由弱作用力控制的相互混合、相互转换的两种 K 粒子态。



高能所所长王贻芳在大亚湾实验基地，他也是该实验的联合发言人。（照片由高能所提供）



加州大学伯克利分校与劳伦斯伯克利国家实验室的陆锦标，摄于岭澳核反应堆前，该反应堆是大亚湾中微子实验所用到的3个反应堆之一。陆锦标也是该实验的联合发言人。（照片由陆锦标提供）

直接的 CP 破缺应当涉及诸如 K 介子这样的粒子的衰变（这也是弱作用过程），而非涉及这种衰变粒子本身所在的状态。这种效应更为微弱因而更难探测。最终，费米实验室 Tevatron 上的 KTeV 实验，与 CERN 超级质子同步加速器上的 NA48 实验，通过仔细观察中性 K 介子的衰变，于 1999 年看到了这种效应。当这些粒子衰变时，会产生一个带电的 π 介子、一个中微子、一个电子或正电子，与一个质子。如果 CP 对称性得以保持，那么应当产生等量的电子与正电子。但是研究者看到了另一种结果：CP 对称性破缺了，衰变产物中的电子略多于正电子。

类似的过程也发生在早期宇宙中。电子与正电子相互湮灭，最终留下来一些电子。然而以这种方式遗留下来的电子数远不足以解释现今宇宙中正反物质的不平衡。这就是科学家有兴趣寻找其他 CP 破缺起源的原因。这些起源涉及其他粒子，当中就包括随处可见的中微子，在这些情形下 CP 破缺的效应可以大得多。

中微子物理学家寻找的这种 CP 破缺将导致中微子与反中微子间微小的区别。普林斯顿高等研究院的保罗·兰盖克（Paul Langacker）解释说，大亚湾实验的结果使人振奋，因为“如果 θ_{13} 为零，那么所有这些 CP 破缺的效应就不存在。”^[33] 而且幸运的是，该混合角足够大，因而研究者认为，中微子部分的 CP 破缺如果存在，就有可能被观测到。

人们已在规划进一步的实验以观察中微子与反中微子的振荡是否不同，以及其差异是否足以解释宇宙中物质与反物质含量的不对称。既然我们已经知道 θ_{13} 非零，陆锦标说，“我们就能更进一步去寻找 CP 破坏。”^[34]

大亚湾实验的 8 个探测器仍在继续全力运行，这意味着科学家可由此更为精确地测量 θ_{13} 混合角。2013 年 8 月，该团队宣布了一项新发现，即对两种中微子质量差的精确测量。陆锦标说，“原则上，如果我们能以很高的精度测量（3 种味道中微子间）所有的质量差，我们就能确

定它们的顺序。这是解决质量排序问题的一个手段。”这涉及找出3种中微子间的相对质量差。^[35]

对于大亚湾实验的结果，朱明中总结道：“我们知道了所有3种中微子的混合角，我们也知道了所有3种中微子的质量各不相同。我们还知道了其中两种质量相当接近。”^[36]下一步就要找出质量等级，也就是中微子质量的排序。这并不需要知道中微子质量的绝对大小，其绝对大小目前还无法探测。确定质量等级，是王贻芳目前领导的江门地下中微子实验室（JUNO）的目标。

JUNO探测器的建造始于2015年1月。它位于中国广东省江门市附近，在香港以西约100千米处。这次实验在各个方面都超过了大亚湾实验。王贻芳说，大亚湾的成功为JUNO吸引了更多国外成员，目前参与合作的科学家已超过300人。^[37] JUNO探测器包含20000吨液态闪烁体，比所有大亚湾探测器的总和还大100倍以上，在世界上的同类探测器中预计也是规模最大精度最高的。该实验装置位于两座核电站之间的一座山中，与两者分别相距约50千米，它被放置于730米深的花岗岩层下直径38米的球形仓内。

数据采集预计始于2020年。王贻芳相信他们在6年之内应能在至少4 σ 的精度下确定中微子间的质量排序（这仍未达到宣称发现所需的阈值）。^[38]虽然亚洲、欧洲与美国的其余7个实验也在进行质量排序测量，王贻芳对JUNO的优势仍充满信心。他说：“JUNO拥有领先的液态闪烁体探测器技术、丰富的反应堆中微子实验经验与创新的实验设计，因而有机会首先确定中微子质量排序。”^[39]这一成就将标志着新的开始而非结束，他补充道，“一旦我们解决了质量排序，我们就有可能知道，需要如何修改标准模型以解释中微子质量。”^[40]

JUNO还有机会在另一个（相关的）领域做出贡献。通过更精确地测量中微子混合角与质量差，该实验将有机会探测到可能存在的第4味中微子。这样的发现要求对标准模型做进一步修改，从而有可能将其

推翻。无论结果如何，王贻芳确信这一努力将使整个中国科学界受益。

“JUNO 将帮助我们建立一个领先的研究团队，使中国成为粒子物理领域的领导者之一，”他说。^[41]

虽然王贻芳目前正着眼于各方面都远超大亚湾实验的 JUNO，但他仍然惦念着大亚湾实验的成功，并为之感到庆幸。到目前为止，大亚湾实验仍是中国开展的最大的基础科学国际合作项目，同时也是中国与美国间最大的合作项目。它涉及 5 个国家和地区（中国大陆〔内地和香港〕、捷克共和国、俄罗斯、台湾与美国）的 38 所大学和超过 250 名科学家。^[42]

幸运的是，这次合作的努力终获回报。大亚湾合作组成员、美国弗吉尼亚州托马斯·杰弗逊国家加速器中心副主任罗伯特·麦丘恩（Robert McKeown）说：“这〔混合角测量〕可以说是中国有史以来做出的最重要的物理结果。”^[43]领导法国中微子实验 Double Chooz 的物理学家埃尔维·德凯莱（Hervé de Kerret）表示同意，他称大亚湾的发现是“完美的确证和漂亮的结果。”^[44]

该合作组在 2012 年 3 月提交到《物理评论快报》的论文中展示了他们测定的混合角，这被《科学》杂志评选为年度十大科学突破。《科学》杂志报道说：“看来，中国粒子物理学家已经到场了。”^[45]该杂志继续说，这一结果将中国的粒子物理项目“印到了地图上”。^[46]虽然需要承认，这是中国进入世界基础研究前沿的重要里程碑，但王贻芳强调，中国物理项目的目标要宏大得多，绝不只是为了得到一个单独的结果。^[47]

2014 年，他和陆锦标被授予潘诺夫斯基实验粒子物理奖。该奖以斯坦福直线加速器中心（SLAC）前主任沃尔夫冈·潘诺夫斯基（Wolfgang Panofsky）的名字命名。美国物理学会将该奖授予陆锦标与王贻芳，以表彰其“领导大亚湾实验做出了对中微子混合角 θ_{13} 的决定性测量。”^[48]



物理学家沃尔夫冈·潘诺夫斯基，斯坦福直线加速器中心（SLAC）前主任（照片由加利福尼亚州斯坦福大学特别收藏于大学档案部的斯坦福历史图片集[SC1071]）

朱明中说，大亚湾“是中国的重要国际合作项目。在考虑巨型对撞机这种需要数千人而不只是几百人规模的项目之前，这是一个重要的先例和必要的第一步。”^[49]

巨型对撞机项目当然是本书的中心内容。但在进入这一主题之前，我们先要讲述实验粒子物理在中国如何产生影响、这一领域如今的地位，以及当前为今后众所期待的巨大飞跃打下了怎样的基础。这个故事，如同大亚湾实验的故事，涉及中国、美国与其他国家间的重要合作。在此过程中尤具影响力的角色，包括出生于中国的诺贝尔奖获得者李政道、杨振宁与丁肇中，以及前文提到的沃尔夫冈·潘诺夫斯基。

新中国高能物理的峥嵘岁月

虽然李政道与杨振宁都在中国长大，但他们的博士研究都是在美国完成的。同样在美国，他们做出了宇称不守恒的工作，并因此获得 1957 年的诺贝尔奖。丁肇中因共同发现了 J/ψ 粒子而获得 1976 年的诺贝尔奖，他的这项研究也是在美国进行的（见第 1 章）。用诺贝尔奖得主杰拉德·埃图夫特的话说，当形成一种“真正的科学文化”后，中国本土也能出现更多的诺贝尔奖，但这需要时间。^[50]

由于中国从 20 世纪初期至今都未能形成这种原生的科学文化，在李、杨、丁之前的其他中国物理学家也只能在海外做出对其领域最重要的贡献。他们远渡重洋的主要原因是中国的大学与实验室无法提供比肩欧美的先进设备，这里既没有技术和行家，也没有足以支撑世界级研究的基础学术设施。

例如，20 世纪 20 年代，吴有训在芝加哥大学的学生时代证实了康普顿效应，即光子与电子碰撞时，能量从前者到后者的转移。吴有训的实验帮助其导师、首次观察到此现象的亚瑟·康普顿（Arthur Compton）获得了 1927 年的诺贝尔奖。中国物理学家赵忠尧于 1930 年发表的一篇论文中描述了他一年前在加州理工学院研究生期间完成的实验。在这项工作中，赵忠尧观察到了后来被确认为正负电子湮灭的效应。他在加州理工学院的同学卡尔·安德森承认赵的工作曾启发他在 1932 年发现了第一种反物质粒子——正电子。安德森因这一发现获得了 1936 年的诺贝尔奖。^[51]1959 年，中国物理学家王淦昌在苏联杜布纳原子核联合研究所工作期间，与同事发现了反 Σ 负超子，这是首次发现理论家所预料的带电反超子。王淦昌的发现确认了超子（即带有一个或多个奇夸克的重子）也具有其相应的反粒子。事实上，保尔·狄拉克在 1928 年首次提出的理论就预言了正电子，同时表明所有自旋为 $1/2$ 的亚原子粒子都有其反粒子。对应于反 Σ 负超子的 Σ 负超子同样具有自旋 $1/2$ ，因而狄拉克的预言也得到了这个实验的支持。

王淦昌是杜布纳联合研究所的创始人之一。在这里，一大批中国物理学家获得了加速器设计与实验的经验。但是他渴望有一天，他和他的同胞能够在中国进行这类研究，而不必出国。这一愿望终于在20世纪70年代初开始得到一些推动。

1971年3月15日，美国政府放宽了持有护照的美国公民赴中国的限制。杨振宁是旅行禁令解除后首批启程回国的华裔美国科学家之一。在其访问期间，杨振宁与长期任中国总理的周恩来会面。杨振宁告诉周恩来，中国的科学训练在理论与基础研究方面都极为缺乏。在1972年的后续访问中，他继续推进这项工作。周恩来将这些意见转达给毛泽东主席，同时力劝中国科学院的研究机构关注基础科学。

毛泽东本人对粒子物理亦有兴趣，因而对这些想法表示认可。他曾就基本粒子新理论的后果与一些哲学家进行讨论，并在1964年断言“物质可以无限分割，”^[52]同时独立地声称，电子亦如原子最终可被分割。^[53]否则他觉得会难以理解。如果物质不可无限分割，毛泽东补充说，“如果有一个终点，那就没有科学了。”³^[54]

1972年10月，李政道在与周恩来会面时，请求在中国开展高能物理项目，并建议周恩来邀请外国科学家访问中国，同时将中国学生与科学家送到CERN、美国国家实验室这样的西方研究中心接受科学训练。他确信他们将受到欢迎。^[55]周恩来表示同意，并在致物理学家张文裕和朱光亚的信中说：“这件事不能再延迟了……高能物理研究和高能加速器的预制研究，应该成为科学院要抓的主要项目之一。”^[56]周恩来又拜访了北京大学副校长与中国科学院副院长周培源，鼓励在他的

3 据整理的谈话记录，毛泽东的原话是：“电子本身到现在还没有分裂，总有一天能分裂的。‘一尺之捶，日取其半，万世不竭’。这是个真理。不信，就试试看。如果有竭，就没有科学了。”引自龚育之：《毛泽东与自然科学》，载于《毛泽东的读书生活》（龚育之、逢先知、石仲泉著，生活·读书·新知三联书店，2014年）。——译者注

大学及全国范围内进行更多基础物理研究。周培源曾跟随阿尔伯特·爱因斯坦学习广义相对论。

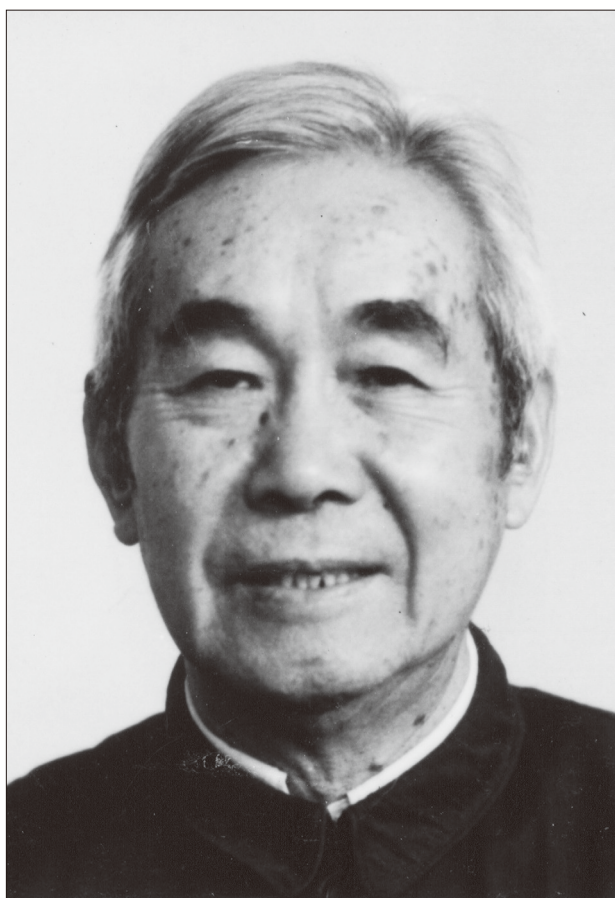
李政道和杨振宁在获得诺贝尔奖后成为中国的民族英雄，他们为推进祖国的物理项目做出了巨大贡献。他们提出，中国可以且应当发展高水平研究。杨振宁曾说，他最大的贡献是“帮助同胞改变了中国人的才华不及外国人的看法”，同时展示了他们也可以在西方统治了几个世纪的领域中取胜。^[57] 丁肇中也是被传颂的华人诺贝尔奖获得者。事实上，在 1976 年 12 月于瑞典斯德哥尔摩领奖时，丁肇中成为了首位用汉语致辞的演讲者。在演讲中，他强调了一个在其辉煌的研究生涯一次次被证实的观点，即实验物理学工作的重要性比起理论家不差分毫，即使后者常被放在更高的地位。丁肇中坚决主张，并通过他的工作证明了，实验家与理论家对于该领域的前进都不可或缺。^[58]

在周恩来的支持下，高能所于 1973 年 2 月成立。张文裕被任命为首任所长，他将利用这一职位推进祖国高能物理事业的发展。在回国前，张文裕曾于 1949—1956 年在美国普渡大学求学。（顺便提一句，张文裕的继任者是叶铭汉和方守贤，其后则是丁肇中的 3 位学生——郑志鹏、陈和生与现任所长王贻芳。）

在李政道的推荐下，周恩来也开始推进高能物理交换项目。张文裕于 1972 年独自访问了 SLAC，并于翌年带领中国物理学家代表团参观了美国与欧洲的实验室。该代表团在 1973 年 5—7 月两个月左右的时间内，访问了 SLAC、费米实验室与布鲁克海文国家实验室，并于回国途中在 CERN 停留。代表团回国后，对修建一台 50GeV 质子对撞机的可能性充满热情，因为这将成为当时世界上最强大的加速器之一，与 SLAC 的对撞机能量相当（只是 SLAC 机器加速电子与正电子而不是质子）。^[59] 1975 年 3 月，周恩来批准了中国科学院提议建造质子对撞机的报告，753 计划就此诞生，其取名源于年份（75 年）和月份（3 月）。



高能物理研究所，位于中国科学院园区。（照片由高能所提供）



张文裕，中科院高能物理研究所首任所长。（照片由高能所提供）

然而李政道对此计划并不热衷，他认为一台能量较低的正负电子对撞机对中国更有益，其建造与运行的成本也更低。潘诺夫斯基赞同李政道的保留意见，认为规模较小的 2GeV 左右的正负电子对撞机将给中国进入实验高能物理领域提供更好的入场券，从而更有机会做出真正的科学贡献。潘诺夫斯基主张，这样一台机器“一箭双雕”，因为它也能为材料科学研究与其他实验室应用提供同步辐射源。这一意见最终被采纳，同时补充了基础物理研究的目标。

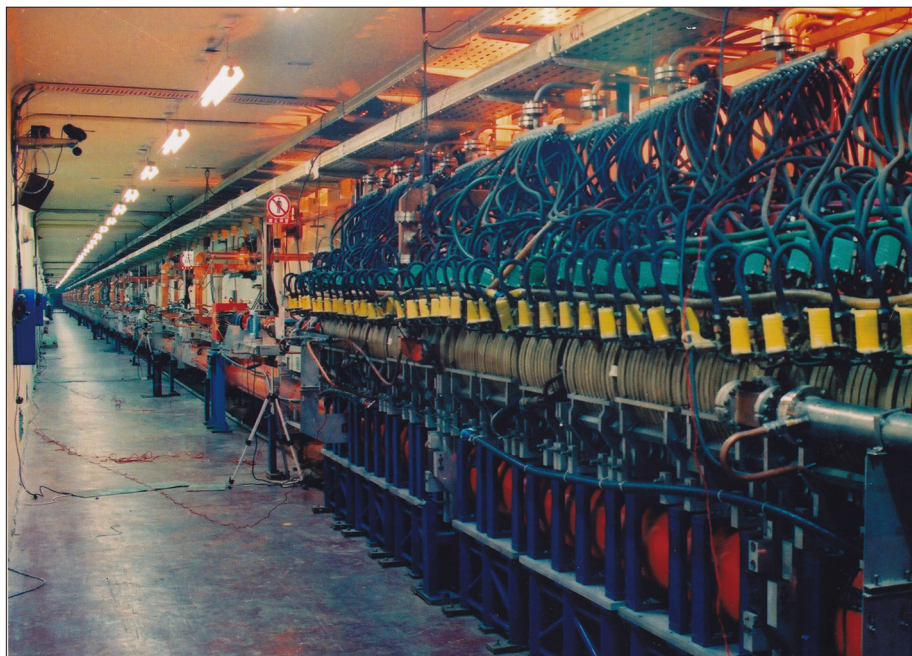
不过周恩来仍继续支持 753 计划，直到 1976 年 1 月去世。毛泽东也在 8 个月后去世。该项目被继续搁置，直到 1976 年 10 月“四人帮”被推翻。四人帮是中共中央内部的一个反党集团，他们对高能物理研究心怀敌意，而且总体上反对基础科学研究。

潘诺夫斯基向张文裕表达了他对 50GeV 对撞机方案的担忧。张文裕作为高能所所长，对国家高能物理项目具有重要影响。张文裕在 1973 年访问 SLAC 期间曾与潘诺夫斯基会面，他邀请潘诺夫斯基于 1976 年 10 月访华。然而这一年 7 月毁灭性的唐山大地震夺去了几十万人的生命，举国为之震动。在这场巨大灾难之后，潘诺夫斯基提出可以推迟访问，他在回忆录中提到，“但是张强调了高能物理的重要性，坚持认为我们必须按计划行事。”^[60]

虽然李政道与潘诺夫斯基的观点终被采纳，但当时中国科学院组织了一场研讨会，表达了对 50GeV 质子机器的信心。因而，在 1976—1978 年领导中国的华国锋于 1977 年又让项目回到了 50GeV 的质子机器上。但经济衰退很快迫使人们放弃了该项目。^[61]

继潘诺夫斯基访华之后，中国国务院副总理方毅前往美国参访 SLAC、费米实验室等地。方毅此行的目的是找出中国自己发展高能物理项目的最佳途径。费米实验室主任罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）支持李政道与潘诺夫斯基的建议，认为规模更为适中的正负电子设备应是最佳选择。

方毅回到中国后不久，便同美国能源部长詹姆斯·施莱辛格（James Schlesinger）于1979年1月就两国在高能物理领域的合作签订正式协议。关于物理部分的协议是更为广泛的科学技术合作协议的一部分，后者由中国最高领导人邓小平与美国总统吉米·卡特（Jimmy Carter）签署。据参加了协议签订仪式的潘诺夫斯基说，随后两国进行了磋商。根据这些讨论的结果，中国政府同意资助建设北京正负电子对撞机（BEPC），该加速器每束粒子能量达2.2GeV，这正是潘诺夫斯基和李政道等一贯的建议。^[62]



北京正负电子对撞机的直线注入器（照片由高能所提供）

在审查了中国科学院制定的计划后，邓小平说：“我赞成加以批准，不再犹豫。”^[63] 经此决定，事情开始快速推进。

由于潘诺夫斯基丰富的加速器物理经验，李政道推荐他担任该项目的科学顾问。潘诺夫斯基接受了该职位，但拒绝从中国接受任何财政资助以保持其独立性。1982年，一个由大约30名中国物理学家和工程师组成的考察团来到SLAC进行BEPC的前期设计。潘诺夫斯基此时

仍是 SLAC 的主任，他描述道，“这还真是个场面：我们有 30 位穿着毛式制服的工程师在实验室里进进出出。”整个设计与大部分建设仅用时 4 年，历时之短非同寻常，其中涉及中国与美国，特别是与 SLAC 间的广泛合作。“[该项目] 按时完成，符合预算，”陈和生说。他在 20 世纪 90 年代末成为高能所所长。^[64]

1984 年 10 月 7 日，建设前的奠基仪式在北京西郊加速器所在地举行。邓小平参加了此次活动，对这一项目表达了十足的信心，他说：“我相信这件事不会错。”

彼时，许多欧美人士来此参观，包括 CERN 前任总干事约翰·亚当斯（John Adams）。在与邓小平的一次会谈中，亚当斯表达了对此项目的疑虑，并问道，在经济基础仍然十分薄弱的情况下，中国为何需要这个高能物理项目。邓小平说：“我们需要为将来打算。”^[65]

高能所前副所长张闯从 BEPC 之初就参与该项目。他说：“这是中国最大的科学项目，也非常重要，因为它标志着中国的开放，以及与欧美在基础研究领域的合作。”他补充道，“整个国家共同工作”。1988 年，BEPC 竣工，同年 10 月 16 日进行了第一束正负电子对撞。^[66]

邓小平与其他政府领导在这月末视察了该设施，向建设者表达了他们的祝贺。李政道对此结果同样感到欣慰，他说：“从这个项目的成功中，我看到了中华民族极大的信心。”^[67]

坐落于高能所所址，紧邻中国科学院大学，BEPC 最初的设备由位于地下的 202 米长的直线加速器构成。它将电子与正电子注入周长 240 米的“储存环”。储存环是布有磁铁的环形隧道。电子与正电子束以

4 邓小平的原话是：“建造加速器是很花钱的，又很费时间。但从长远发展的利益着眼，既然要搞四个现代化，就得看高一点，看远一点，不能只看到眼前。”引自卢佳：《邓小平和中国高科技发展》，《湘潮》2014 年 12 期。——译者注

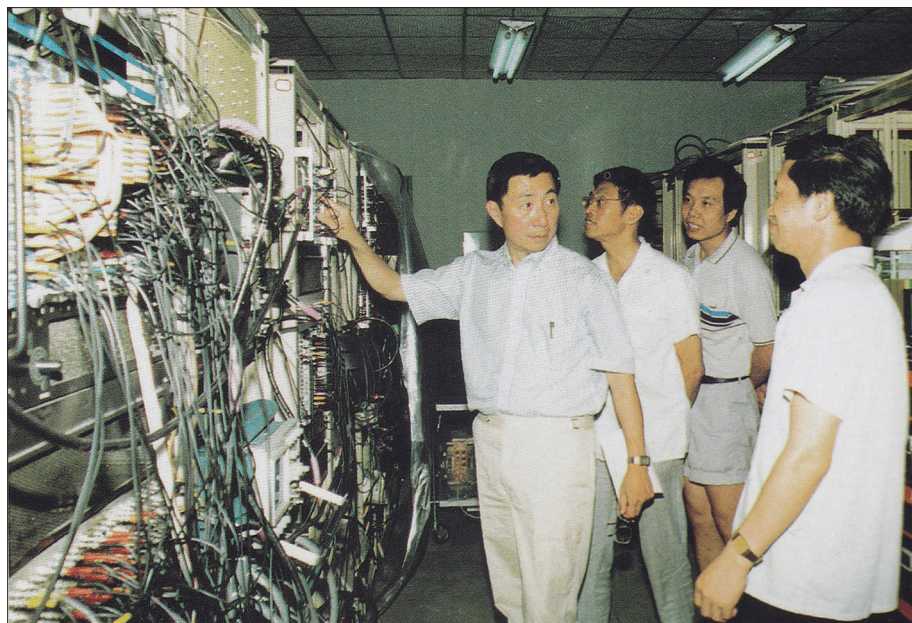
近光速在其中反向运行，随后发生巨大撞击，对撞能量达 $2 \sim 5\text{GeV}$ 。^[68] 电子束与正电子束在名为北京谱仪（BES）的探测器中心相交。



北京谱仪（BES）控制室（照片由高能所提供）

BEPC 所关注的能量区域有时被称为“粲物理”，亦即研究包含粲夸克的粒子。在一定意义上说，该领域始于丁肇中与里克特在 1974 年对 J/ψ 粒子的发现，因为该粒子包含一个粲夸克与一个反粲夸克。这一发现导致了其他一系列发现，并称为“十一月革命”，它们证实了夸克概念的真实性，证实了这种夸克在物理过程中会产生影响。

然而这一革命尚未终结。“在这一能区 [还] 有很多事情正在发生，”北京实验的联合发言人、夏威夷大学的物理学家弗莱德·哈里斯（Fred Harris）说。陈和生十年前评论道，“我们统治了”这一特定的能量区域，而且很可能至今仍然如此。陈和生提到的这种统治的原因，很可能就在于不少领导 BEPC 实验的中国科学家，包括陈和生自己及其继任者王贻芳，都曾在丁肇中的实验室中接受训练。



丁肇中视察北京谱仪设备。（照片由高能所提供）

与此前中国提出的 50GeV 对撞机方案相比，陈和生说，BEPC 的“能量更低但是更有趣。”^[69]BEPC 上的正负电子对撞可以被细调以产生粲夸克及其反夸克。束流能量也可被调节至大量产生 J/ψ 粒子及其激发态 ψ' 。在该能量区域发生的正负电子湮灭还能产生 τ 轻子，即比电子与 μ 子更重的近亲。

这正是斯坦福物理学家马丁·珀尔在 1975 年通过 SLAC 的同类碰撞发现 τ 粒子的方式。对于发现 τ 子的这段经历，珀尔回忆到，当时对 τ 子质量的最佳估计来自 SLAC 的斯坦福正负电子加速环（SPEAR），其值为 1784MeV（即 1.784GeV）。“直到 1992 年，即 14 年后，对 m_τ 的测量才有所改进，BES 合作组利用 BEPC 的 [正负电子] 对撞才报告出 $m_\tau=1776.9\pm0.5\text{MeV}$ ”。^[70]换言之，BES 团队将 τ 子质量测量的精度提高了 10 倍。

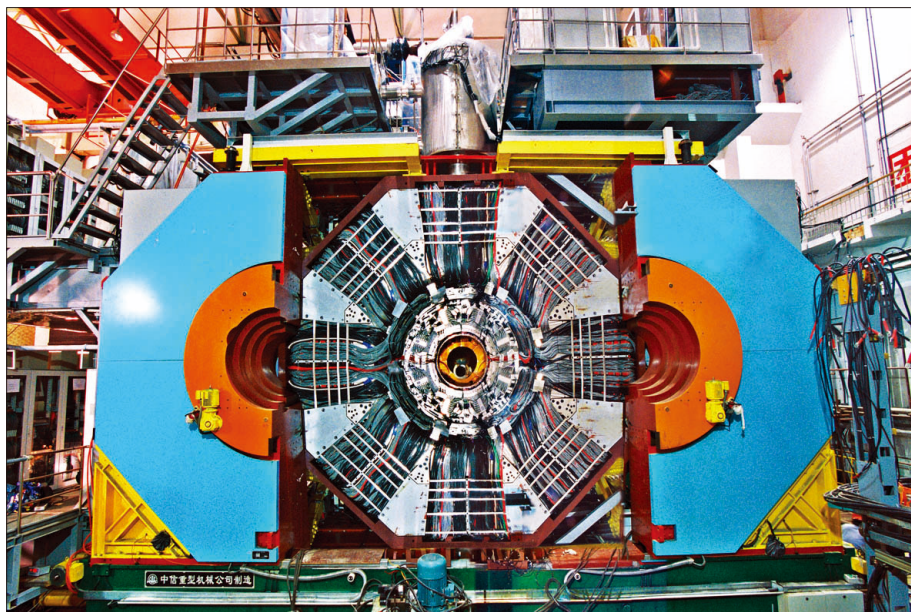
1999 年，BEPC 上的实验在 2~5GeV 区域得到了对“R 值”更精确的测量。R 值是标准模型的重要参数，它度量了正负电子对撞产生强子（即包含夸克的粒子）而非 μ 子（一种轻子）的可能性。这一测量

使用了 BEPC 新近升级的探测器 BESII，将实验精度提高了 3 倍。降低 R 值测量的不确定度有助于更好地估计希格斯质量。“旧的 R 值有很大的不确定度，用它估计最可能的希格斯质量在 100GeV 以下，”哈里斯解释说，“改进了 R 值后，我们所期望的希格斯质量就升高到了 100GeV 以上。”他与合作者在 2000 年前后就此发表了一系列文章。12 年后，LHC 上的实验发现希格斯质量为 125GeV，与 BEPC 的估计一致。^[71]

除了取得这些特别的成就，BEPC 还有更为广泛的用途。由于这台机器的成功运行，陈和生评论道：“新一代加速器工程师与数据工程师 [在中国] 成长起来了。”^[72]

的确，如潘诺夫斯基所说，“BEPCI 和其探测器的成功……引导了中国高能物理项目在未来的扩张。”^[73]虽然人们也曾考虑过更富雄心的想法，大家最终还是决定保持机器原有的隧道，同时将其他一切几乎完全更换。布有磁铁的两组独立的储存环替代了原有的单个储存环。其中存储电子的储存环可运行 93 束电子，而原先仅能运行 1 束。另一个储存环用于存储正电子，同样也可注入 93 束正电子。由于可以装备如此多的正负电子，这一改装过的加速器——称为 BEPCII——能够将碰撞率提高 100 倍，这与一个称为“亮度”的参数密切相关。这里的要点是，对撞数的大幅提升意味着该机器能够以惊人的速度收集数据。

另一项升级是提高探测器的灵敏度。经过又一次的重组后，该探测器被重新命名为 BESIII。与中国此前所有设备都不同，重达 800 吨的 BESIII 用更为强大的超导磁铁替换了原先的常规磁铁，以测量对撞所产生粒子的能量与动量。在电子与正电子束进入探测器核心的相互作用区域后，这些磁铁将它们聚焦。BEPCII 同样使用超导技术，使正负电子以适当的能量环行，因为所有带电粒子在磁场的弯曲下就会发射能量，这种现象称为同步辐射。



北京谱仪 III (BESIII) (照片由高能所提供)

BEPCII 的建设始于 2004 年 1 月。高能所利用自己的机械厂，设计建造了升级该对撞机与探测器所用的所有新设备。本次升级于 2008 年完工，同年 7 月 19 日进行了首次对撞。BEPCII 几乎立刻创造了其运行能区的亮度新纪录。如《CERN 情报》在 2008 年的报道所述，在首次对撞后，“全力运行的 BEPCII/BESIII 将成为全世界研究粲介子与 τ 轻子的首要设备。”^[74]

BEPCII 的亮度比原先的 BEPCI 提高了百倍，这也使其亮度达到了 CLEO 的 10 倍。位于康奈尔大学的 CLEO 是 BEPC 的竞争对手，在运行了近 30 年后于 2008 年关机。不过这一升级绝不是为了炫耀，而完全是出于科学的原因。“在统计量有限的情形下，你也许能够看到一些不寻常的线索，” BESIII 合作者、罗切斯特大学的物理学家爱德华·索恩代克 (Edward Thorndike) 说，“但是拥有 10 倍于前的数据，你就能分辨这到底是统计涨落还是真实的效应，而且”——如果后者是真的——“你就做出了激动人心的发现。”^[75]

“多亏中国人，我们才能够回答粒子物理中一些最为引人入胜的问题，”明尼苏达大学的物理学家罗纳德·波灵（Ronald Poling）在升级工作结束后说，“中国人建造了它，我们就来了。”^[76]

总而言之，来自 11 个国家 50 多个研究机构的大约 350 名物理学家在高能所的这一设备上进行实验。^[77] 据陈和生说，该设施经过整修后，其主要物理目标是“在粲物理中做精确测量；以 J/ψ 与 ψ' 的能量区域为主，搜寻新粒子和新现象。”^[78]

泛言之，这一项目的重点是在低能量下检验标准模型。人们对强作用的理论即量子色动力学（QCD）在 LHC 探测的高能区比低能区研究得更透彻，BESIII 发言人、高能所的物理学家沈肖雁提到，“在我们研究的低能区域，QCD 预言了新的粒子种类。我们已知的所有由夸克构成的粒子，即强子，包含 2 个或 3 个夸克。但是 QCD 预言应该能看到包含 4 个、5 个或 6 个夸克的强子，以及 2 个夸克与 1 个胶子，或者仅由胶子构成的混合态。”由 2 个或更多胶子构成的复合粒子被称为胶球。胶球的存在是标准模型与 QCD 的重要预言，但仍未被实验证实。沈肖雁说，找到它们将是对 QCD 理论很好的检验，而“目前，这 [BEPCII] 是寻找此类粒子态的最佳场所。”^[79]

2013 年 6 月 17 日发生了大新闻。BESIII 合作组成员与位于日本筑波的高能加速器研究机构（KEK）的 BELLE 合作组成员分别独立宣布了由 4 个夸克构成的粒子，称为 $Z_c(3900)$ 的证据。两组实验都通过近光速的正负电子对撞来制造这种粒子。BESIII 团队在此方面独具优势，因为他们可将机器（BEPCII）精准地调节到 4.260 GeV 以制造另一种称为 $Y(4260)$ 的粒子，它由一个粲夸克、一个反粲夸克与一个胶子构成。BELLE 团队也制造出了 $Y(4260)$ 粒子，但他们只能通过间接的途径产生它，因为他们的加速器（KEKB）运行能量更高。

$Y(4260)$ 粒子已在 2005 年 SLAC 的 BaBar 实验中被发现，但是 BESIII 与 BELLE 的研究者看到了新现象： $Y(4260)$ 只存留约 10^{-23} 秒，在

其衰变产物中，他们发现了一种从未看见过的带电粒子—— $Z_c(3900)$ 。^[80]对业已关闭的 CLEO 加速器的数据做分析也确证了这一发现。

$Z_c(3900)$ 包含 4 个夸克，这一点并无争议；不过 $Z_c(3900)$ 究竟是什么，目前尚无定论。它可能就是一个包含 4 个夸克的粒子（即“四夸克”粒子），也可能是一个亚原子领域的分子，即两个介子构成的偶对，其中每个介子各包含一个夸克与一个反夸克。德国 DESY 高能物理实验室的物理学家阿米德·阿里（Ahmed Ali）更倾向于四夸克的解释，因为两个介子构成的“分子”应该会时而分裂成两半，但这并未被观察到。^[81]

正确的解释仍有待进一步探索，但是不管最终的解释倾向于哪一边， $Z_c(3900)$ 仍将是一种“新的物质形式”，匹茨堡大学的物理学家艾里克·斯旺森（Eric Swanson）坚称。而找出对其本质的解释将使物理学家进一步了解强力将夸克束缚在一起的各种方式。^[82]

与此同时，BESIII 的研究者将继续专注于他们已有的数据，也将继续产生新的数据，以期揭示 $Z_c(3900)$ 的真实身份。他们还将研究其他四夸克态的候选者，比如 BEPCII 新近用类似于发现 $Z_c(3900)$ 的手段所发现的荷电粒子 $Z_c(4020)$ ，还有 BELLE 实验十几年前发现的电中性粒子 $X(3872)$ 。从 $Y(4260)$ 的衰变出发，一批四夸克物质开始出现，弗莱德·哈里斯说，“虽然理论图像仍需补全，但越来越多的线索表明我们正目击新的物质形式。这类神秘粒子的全新‘动物园’开始展现，看来我们很快就能得到全新的分类系统以理解它们。”^[83]

“这不只是发现越来越多的粒子，” BESIII 合作者，来自印第安纳大学的莱安·米切尔（Ryan Mitchell）说，“我们正开始看见新的模式。”^[84]

这幅图像仍有许多令人困惑之处，澄清这些问题仍需 BEPCII 的研究者继续研究很多年。沈肖雁说，按照计划该加速器将运行到 21 世纪 20 年代初期至中期，“我们希望使这些物理学家继续忙碌，进行重要的实验，同时我们也要准备下一代高能机器。”^[85]

比如，哈里斯就希望在接下来一段时间继续来北京。“在 BEPCII 我们能做一些独一无二的事情，”他说，比如调节机器以大量产生 $Y(4260)$ 粒子。“只要中国政府继续资助，这里就还有很多有趣的物理可以做。”^[86]

北京设备已从 1989 年运行至今，其间经历升级。当下，一个正在迫近的首要问题是，谁来代替它。与此相关的问题是，中国是否已经准备好向一个更大的对撞机前进，这台机器将首先作为正负电子加速器工作，随后升级为质子对撞机。推动新对撞机的中国核心物理学家中，大多数都具有在主流设备工作的经历，比如 CERN 的 LHC 或大型正负电子对撞机（LEP），以及尺寸更为适中的 BEPC。^[87]

高等研究院院长罗伯特·戴格拉夫认为中国具有获得该领域主动权的有利条件，他“对中国进步的前景充满热情。”他说，当前“以一国之力支持超大规模的基础设施项目，中国独具实力。”这部分是由于“科学技术是第一生产力”的坚定信念，戴格拉夫补充道，“中国很可能是唯一为未来 40 到 50 年做长远科学规划的国家，”而这对于高能物理来说尤为关键，因为其中找到重要问题的答案可能需要不止一代人的努力。对希格斯玻色子 48 年的探寻即是一例。^[88]

高能所的张闯为中国做对撞机设计已逾 40 年，他同样认为现在正是祖国开始构思大问题的时机。“从 753 项目开始，这就是我们长久梦想的一部分，当时我们想在能量前沿赶超 CERN 与费米实验室这样的世界领先实验室，”他说，“为了实现梦想我们必须先要有梦想，但为了有机会实现它我们也必须努力工作。”^[89]

过去大约 20 年来，哈里斯都在北京从事粒子物理研究。他不想让这个梦想溜走。他承认，建造这台“巨型对撞机”规模的机器将提出巨大的挑战，无论是在技术方面还是其他方面。中国要想建立这样的功绩肯定需要外来的帮助。另一方面，哈里斯说，“我曾为 BEPCII 与

BESIII 感到担忧，但中国能够在预算之内按时完成这些升级，而且他们也能独立制造超导磁铁。”

从这些项目到达环形正负电子对撞机及随后的超级质子对撞机，将是更为巨大的一步，也可以说是一次量子跳跃。当然，从构想与修建 BEPC 至今的 30 多年里，中国也绝非原地踏步。“这些年经历了极大的提高与进步，”哈里斯说，“不仅仅在物理领域、而是在整个国家的层面上，以至于美国能源部已开始考虑一台中国对撞机的可能性。”根据他丰富的经验，以及多年来参与中国粒子物理项目的经历，哈里斯也在认真考虑这种可能性。^[90]

参考文献

- [1] Chao-Lin Kuo, Stanford University (telephone interview with the author). April 18, 2014.
- [2] Meng Su, MIT (interview with the author), July 2, 2015.
- [3] Ibid.
- [4] Eugenie Samuel Reich. “Dark-matter hunt gets deep.” *Nature*. 494 (February 21, 2013), pp. 291-2.
- [5] Adrian Cho. “Chinese team is catching up in hunt for dark matter.” *Science* (online). August 26, 2014. <http://news.sciencemag.org/physics/2014/08/chinese-team-catching-hunt-dark-matter>.
- [6] X. B. Cao, et al. “PandaX: A Liquid Xenon Dark Matter Experiment at CJPL.” May 12, 2014. <http://arxiv.org/abs/1405.2882>.
- [7] Ibid.
- [8] Ibid.
- [9] Eliza Strickland. “Deepest Underground Dark-Matter Detector to Start Up in China.” *IEEE Spectrum* (online). January 29, 2014. <http://spectrum.ieee.org/aerospace/astrophysics/deepest-underground-darkmatter-detector-to-start-up-in-china>.

- [10] Eugenie Samuel Reich. "Dark-matter hunt gets deep." *Nature*. 494 (February 21, 2013), pp. 291-2.
- [11] X. B. Cao, et al. "PandaX: A Liquid Xenon Dark Matter Experiment at CJPL." <http://arxiv.org/abs/1405.2882>, May 12, 2014.
- [12] Charles P. Pierce. "Samuel Ting's space odyssey." *Boston Globe Magazine*. April 10, 2011. <http://www.bostonglobe.com/magazine/2011/04/09/samuel-adventure-space-odyssey-unlocking-deepest-billion-university-nearly-decades-mysteries-universe-later-physicist-hatched-plan-finally-bold-experiment-space/EquSUjLVuDmZTjgV9Xo7NK/story.html>.
- [13] Eric Hand. "Particle physics: Sam Ting's last fling." *Nature*. 455 (October 15, 2008), pp. 854-857.
- [14] Andrew Grant. "Sam Ting tries to expose dark matter's mysteries." *Science News*. 187 (March 21, 2015).
- [15] Kathryn Jepsen. "Pursuit of dark matter progresses at AMS." *Symmetry* (online). September 18, 2014. <http://www.symmetrymagazine.org/article/september-2014/pursuit-of-dark-matter-progresses-at-ams>.
- [16] "Latest measurements from the AMS experiment unveil new territories in the flux of cosmic rays." *CERN Press Office* (online). <http://press.web.cern.ch/press-releases/2014/09/latest-measurements-ams-experiment-unveil-new-territories-flux-cosmic-rays>.
- [17] John Matson. "Dark Matter Signal Possibly Registered on International Space Station." *Scientific American* (online). April 3, 2013. <http://www.scientificamerican.com/article/dark-matter-ams/>.
- [18] Ibid.
- [19] "Latest measurements from the AMS experiment unveil new territories in the flux of cosmic rays." *CERN Press Office* (online). <http://press.web.cern.ch/press-releases/2014/09/latest-measurements-ams-experiment-unveil-new-territories-flux-cosmic-rays>.

- [20] Lisa Grossman. "Spaceborne dark matter hunter sees telltale antimatter." *New Scientist*. April 3, 2013. <http://www.newscientist.com/article/dn23342-spaceborne-dark-matter-hunter-sees-telltale-antimatter.html>.
- [21] Sarah Charley. "AMS results create cosmic ray puzzle." *Symmetry* (online). April 15, 2015. http://www.symmetrymagazine.org/article/april-2015/ams-results-create-cosmic-ray-puzzle?email_issue=736.
- [22] Dennis Overbye. "A Costly Quest for the Dark Heart of the Cosmos." *New York Times* (online). November 16, 2010. <http://www.nytimes.com/2010/11/17/science/space/17dark.html?pagewanted=all>.
- [23] Clara Moskowitz. "Antimatter Hunter: Q&A with Nobel Laureate Sam Ting." *Space.com*. May 15, 2011. <http://www.space.com/11671-shuttle-alpha-magnetic-spectrometer-ting.html>.
- [24] David A. Weintraub. *How Old is the Universe?* (Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2011), p. 285.
- [25] John Bahcall. "Solving the Mystery of the Missing Neutrinos." *Nobelprize.org*. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/bahcall/.
- [26] Steven Weinberg. "The Revolution That Didn't Happen." *New York Review of Books*. 45 (October 8, 1998), pp. 48-52.
- [27] John Bahcall. "Solving the Mystery of the Missing Neutrinos." *Nobelprize.org*. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/bahcall/.
- [28] Ming-Chung Chu, Chinese University of Hong Kong (interview with the author at the Hong Kong University of Science and Technology), August 14, 2014.
- [29] Matt Strassler. "Neutrino Types and Neutrino Oscillations." *Of Particular Significance* (blog). October 5, 2011. <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/neutrinos/neutrino-types-and-neutrino-oscillations/>.
- [30] Jon Butterworth. *Most Wanted Particle*. (New York: The Experiment, 2014), p. 213.

- [31] “Daya Bay collaboration observes a new kind of neutrino oscillation.” *CERN Courier*. April 27, 2012. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/49336>.
- [32] Yifang Wang. “Daya Bay Neutrino Experiment and the Future.” (lecture at Harvard University). December 2, 2014.
- [33] Adrian Cho. “Physicists in China Nail a Key Neutrino Measurement.” *Science* (online). March 8, 2012. <http://news.sciencemag.org/asia/2012/03/physicists-china-nail-key-neutrino-measurement>.
- [34] Eugenie Samuel Reich. “Neutrino oscillations measure with record precision.” *Nature.com* newblog. March 8, 2012. <http://blogs.nature.com/news/2012/03/neutrino-oscillations-measured-with-record-precision.html>.
- [35] Kathryn Jepsen. “Daya Bay furthers neutrino knowledge.” *Symmetry* (online). August 22, 2013. <http://www.symmetrymagazine.org/article/august-2013/daya-bay-furthers-neutrino-knowledge>.
- [36] Ming-Chung Chu (interview with the author at the Hong Kong University of Science and Technology), August 14, 2014.
- [37] Jiao Li. “China to build a huge underground neutrino experiment.” *Physics World* (online). March 4, 2014. <http://physicsworld.com/cws/article/news/2014/mar/24/china-to-build-a-huge-underground-neutrino-experiment>.
- [38] Yifang Wang. “Daya Bay Neutrino Experiment and the Future” (lecture at Harvard University). December 2, 2014.
- [39] IHEP. “Groundbreaking at JUNO” (press release). January 10, 2015.
- [40] Yifang Wang, IHEP (interview with the author at Harvard University), December 2, 2014.
- [41] Jiao Li. “China to build a huge underground neutrino experiment.” *Physics World* (online). March 4, 2014. <http://physicsworld.com/cws/article/news/2014/mar/24/china-to-build-a-huge-underground-neutrino-experiment>.

- [42] Kendra Snyder. "Catching Neutrinos in China." *Symmetry*. 3 (October-November 2006), pp. 16-21.
- [43] Adrian Cho. "Physicists in China Nail a Key Neutrino Measurement." *Science* (online). March 8, 2012. <http://news.sciencemag.org/asia/2012/03/physicists-china-nail-key-neutrino-measurement>.
- [44] Eugenie Samuel Reich. "Neutrino oscillations measure with record precision." *Nature* (online). March 8, 2012. <http://blogs.nature.com/news/2012/03/neutrino-oscillations-measured-with-record-precision.html>.
- [45] Adrian Cho. "Physicists in China Nail a Key Neutrino Measurement." *Science* (online). March 8, 2012. <http://news.sciencemag.org/asia/2012/03/physicists-china-nail-key-neutrino-measurement>.
- [46] Adrian Cho. "Key Neutrino Measurement Signal's China's Rise." *Science*. 365 (March 16, 2012), pp. 1287-88.
- [47] Charles Petit. "Heart of the matter." *Science News* (online). 183.2 (January 10, 2013). <https://www.sciencenews.org/article/heart-matter>.
- [48] "2014 W.K.H. Panofsky Prize in Experimental Particle Physics Recipient." *APS Physics*. http://www.aps.org/programs/honors/prizes/prizerecipient.cfm?last_nm=Luk&first_nm=Kam-Biu&year=2014 and http://www.aps.org/programs/honors/prizes/prizerecipient.cfm?last_nm=Wang&first_nm=Yifang&year=2014.
- [49] Ming-Chung Chu (interview). August 14, 2014.
- [50] Gerard 't Hooft. Utrecht University (telephone interview with the author), April 24, 2015.
- [51] Cong Cao. "Chinese Science and the 'Nobel Prize Complex'." *Minerva*. 42 (2004), pp. 151-172.
- [52] Mark Walker (editor). *Science and Ideology: A Comparative History*. Routledge (Abingdon, Oxford, UK: Routledge, 2003), p. 56.
- [53] Stuart Schram. *The Thought of Mao Tse-Tung*. Cambridge University Press (Cambridge, UK: 1989), p. 168.

- [54] Dennis Overbye. "China Pursues Major Role in Particle Physics." *New York Times* (online). December 5, 2006. <http://www.nytimes.com/2006/12/05/science/05china.html>.
- [55] Zuoyue Wang. "U.S.-China scientific exchange." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*. 30 (1999), pp. 249-277.
- [56] "China's IHEP celebrates its first 40 years." *CERN Courier* (online). November 20, 2013. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/55335/3>.
- [57] Zuoyue Wang. "U.S.-China scientific exchange." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*. 30 (1999), pp. 249-277.
- [58] Wenxian Zhang. "Ting, Samuel C.C." *Asian American History and Culture: An Encyclopedia* (edited by Huping Ling and Alan W. Austin). Routledge (Abingdon, Oxon, UK: 2015), p. 237.
- [59] Dennis Overbye. "China Pursues Major Role in Particle Physics." *New York Times* (online). December 5, 2006. <http://www.nytimes.com/2006/12/05/science/05china.html?pagewanted=all>.
- [60] Wolfgang K.H. Panofsky. *Panofsky on Physics, Politics, and Peace*. Springer (New York, 2007), pp. 129-134.
- [61] Zuoyue Wang. "U.S.-China scientific exchange." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*. 30 (1999), pp. 249-277.
- [62] Wolfgang K.H. Panofsky. *Panofsky on Physics, Politics, and Peace*. Springer (New York, 2007), pp. 129-134.
- [63] Liu Huaizu (Chief Editor). *The Beijing Electron Positron Collider*. (Beijing, IHEP, 1994), p. 40.
- [64] Dennis Overbye. "China Pursues Major Role in Particle Physics." *New York Times* (online). December 5, 2006. <http://www.nytimes.com/2006/12/05/science/05china.html?pagewanted=all>.
- [65] Chuang Zhang, IHEP (interview with the author at IHEP). August 8, 2014.
- [66] Ibid.

- [67] Liu Huaizu (Chief Editor). *The Beijing Electron Positron Collider*. (Beijing, IHEP, 1994), pp. 93, 231.
- [68] Z. G. Zhao. "BES Recent Results and Future Plans." *Arxiv.org*. December 22, 2000. <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0012056>.
- [69] Dennis Overbye. "China Pursues Major Role in Particle Physics." *New York Times* (online). December 5, 2006. <http://www.nytimes.com/2006/12/05/science/05china.html?pagewanted=all>.
- [70] Martin L. Perl. "The Discovery of the Tau Lepton." SLAC-PUB-5937, September 1992.
- [71] Fred Harris, University of Hawaii (telephone interview with the author). February 27, 2015.
- [72] Dennis Overbye. "China Pursues Major Role in Particle Physics." *New York Times* (online). December 5, 2006. <http://www.nytimes.com/2006/12/05/science/05china.html?pagewanted=all>.
- [73] Wolfgang K.H. Panofsky. *Panofsky on Physics, Politics, and Peace*. Springer (New York, 2007), pp. 133-134.
- [74] "BEPC II celebrates the first collision events." *CERN Courier* (online). August 18, 2008. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/35434>.
- [75] Kelen Tuttle. "Chasing charm in China." *Symmetry*. May 2009, pp. 15-19.
- [76] Ibid.
- [77] "BESIII observes new mystery particle." *CERN Courier* (online). April 26, 2013. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/53072>.
- [78] Hesheng Chen. "China agrees upgrade of its particle collider." *CERN Courier* (online). March 31, 2003. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/28824>.
- [79] Xiaoyan Shen (interview with the author at IHEP). August 5, 2014.
- [80] Eric Swanson. "Viewpoint: New Particle Hints at Four-quark Matter." *APS Physics* (online). June 17, 2013. <http://physics.aps.org/articles/v6/69>.

- [81] Devin Powell. “Quark quartet opens fresh vista on matter.” *Nature*. 498 (June 20, 2013), pp. 280-281.
- [82] Lisa Grossman. “What a new jumbo particle reveals about extreme matter.” *New Scientist* (online). June 24, 2013. <http://www.newscientist.com/article/dn23726-what-a-new-jumbo-particle-reveals-about-extreme-matter.html>.
- [83] “High Energy Physicists Predict New Family of Four-Quark Objects.” *Kaunānā. The Research Publication of the University of Hawaii at Manoa*. November 6, 2013.
- [84] Kelen Tuttle. “Chinese collider expands particle zoo.” *Symmetry* (online). December 9, 2013. <http://www.symmetrymagazine.org/article/chinese-collider-expands-particle-zoo>.
- [85] Xiaoyan Shen (interview with the author at IHEP). August 5, 2014.
- [86] Fred Harris, University of Hawaii (telephone interview with the author). February 27, 2015.
- [87] Yifang Wang, IHEP (e-mail correspondence with the author), April 4, 2015.
- [88] Robbert Dijkgraaf, Institute for Advanced Study (telephone interview with the author). April 20, 2015.
- [89] Chuang Zhang (interview with the author at IHEP). August 8, 2014.
- [90] Fred Harris, University of Hawaii (telephone interview with the author). February 27, 2015.

第 5 章

为了全世界、 属于全世界的加速器

超越 LHC：CEPC-SPPC 计划

1993 年 SSC 项目被取消时，世界并未失去一切，因为在日内瓦的大型强子对撞机（LHC）项目计划仍在推进中。不过部分物理学家与决策者已开始大声质疑，这台有史以来最为强大的粒子加速器，是否会成为同类机器的终结者。有人甚至称之为“终极强子对撞机（Last Hadron Collider）”。引发此类猜测的部分原因在于这座庞然大物身价不菲。这台机器的探测器大如教堂，其环形隧道长达 27 千米，深埋于日内瓦郊外地表以下约 100 米左右的岩层中。在 2008 年 9 月第一束质子开始在隧道中循环前，它已耗资大约 80 亿美元。^[1]另一些讨论则围绕一个物理问题展开：当 LHC 在 2035 年左右关机后，是否还有那么多至关重要的科学问题，值得投入巨资建造一台更庞大且更昂贵的继任者？

2012 年，亦即 LHC 首次实现质子对撞的 3 年后，日内瓦的科学家们宣布发现了寻找已久的希格斯玻色子，这被认为是标准模型的封顶之作。一时间，人们沉浸在这次突破带来的狂欢中。在庆祝巨大成就的同时，人们开始思索这个发现产生的后果与带来的问题。不过仅仅数周内，就有物理学家开始将目光转向未来。按计划，LHC 至少仍将运行 20 多年，而一批研究骨干已经在考虑下一台机器，或者更准确地说，

下一组机器，将会是什么。全世界首台质子对撞机是 CERN 的交叉储存环（ISR），在它开始质子对撞 40 年后，这些研究骨干拒绝接受 LHC 是同类机器终结者的看法。对他们来说，希格斯的发现打开了物理学新纪元的大门，这仅仅是开始而远非结束。

着眼未来，这些物理学家感到至少在两大前沿方向上还有紧迫的工作要做：他们想更加仔细地研究希格斯玻色子，这远远超过了 LHC 所能提供的探测精度，因为希格斯粒子与我们已知的任何粒子都不相同。他们还希望探索 $14 \sim 100\text{TeV}$ 区域的能量前沿。这一区域是 LHC 目前的状态所无法企及的，因此它依然是一片未知世界。

希格斯质量约为 125GeV ，相对较轻，这使研究者受到鼓舞，因为它意味着（能量远低于 LHC 的）正负电子加速器将是大量制造希格斯玻色子的理想设备：不像作为夸克与胶子的复杂混合体的质子对撞，它没有这样繁杂的背景。希格斯粒子的轻质量在这里是一个优点，因为这意味着质心对撞能量在 240GeV 左右的正负电子对撞机作为“希格斯工厂”将非常合适。

这也意味着环形对撞机是切实可行的选项。当“相对论性”带电粒子以近光速环行时，将以 X 射线形式产生同步辐射，辐射能量的发射功率正比于束流能量的 4 次方。 240GeV 环形对撞机对应的同步辐射损失还可以控制；但是当对撞能量提升至 500GeV 或更高时，同步辐射的能损就会巨增，导致极度的功率消耗，对其进行控制就变得极为困难和昂贵。

同步辐射的损耗率还反比于粒子运行的环形轨道周长的平方。因而建造周长较大的环形轨道，譬如说 100 千米尺度而非 27 千米，会更有优势。这样大的隧道同时还有一个额外好处：它今后可以用来加速质子，从而实现 100TeV 量级的对撞，比 LHC 的能量高出 7 倍左右。（对于强子对撞机来说，同步辐射是相当次要的因素，这是因为同步辐射

功率反比于粒子质量的 4 次方。由于正负电子的质量比质子轻 2000 倍左右，所以它们的同步辐射能损效率比质子快十万亿倍。^[2]

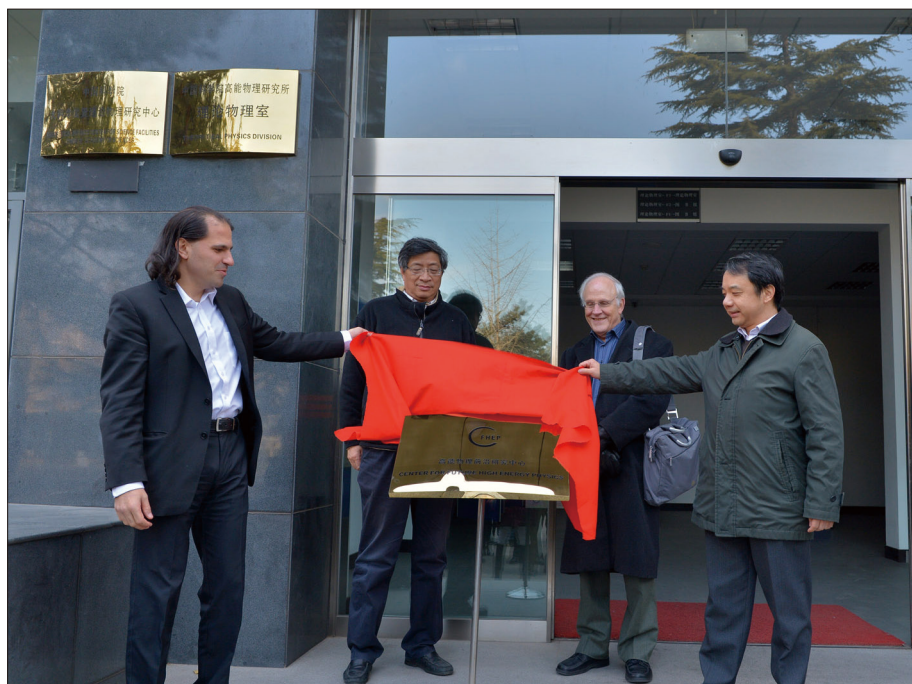
2012 年 1 月，中国物理学家讨论了修建环形正负电子对撞机并将其用作希格斯工厂的可能性，不过这一想法与当时的主流观念相悖。

“LHC 之后下一个‘大’对撞机已是国际高能物理学界讨论了十几年的话题，”日内瓦大学的物理学家阿兰·布隆德尔（Alain Blondel）与同事在 2013 年写道，“自此以后……在国际未来加速器委员会（ICFA）的领导下，已经做出了一系列决定。”根据这些决定，大家关心的设备“应当是一台〔正负电子〕直线对撞机”。^[3]中国的计划对此成见提出了挑战，主张一台环形加速器作为希格斯工厂完全可以胜任。实际上，布隆德尔等人以前倡导过同样的想法，并在希格斯发现之后的 2012 年 8 月继续推动此事。他们建议，这台专门为制造希格斯而优化的机器，称为 LEP3，可被安置在 LHC 隧道内（也是大型正负电子对撞机即 LEP 的原址）。

在 2012 年 9 月举行的一次会议上，中国团队认定，单独建造一座希格斯工厂的科学收益与所需的巨额投资并不匹配。在高能所所长王贻芳的建议下，他们决定在该计划中加入另一要素，从而使整个方案更具说服力。根据新方案，他们的第一步依旧是建造环形正负电子对撞机（CEPC），其主要目的就是研究希格斯。而下一重要步骤则是将一台超级质子对撞机（SPPC）安装在同一条隧道内。这一计划的亮点在于，中国的研究者们将从他们最富经验的正负电子技术起步，同时预留出足够的时间，以发展他们远不熟悉的、能量高很多的质子对撞机技术。这个会上大家一致赞同该提议值得继续研究。

两个月后在费米实验室举行的会议上，高能所加速器中心主任秦庆介绍了这个两阶段加速器项目的提议，即分享同一条隧道的环形希格斯工厂与质子对撞机。据王贻芳说，反响热烈，“这一想法立刻吸引了几乎所有人的注意力。”^[4]他决定在来年将该项目定型，同时召集

了一个几乎全由中国科学家构成的正式研究组，以更缜密地调查这一可能性。来自中国 19 所大学与研究机构的 120 多名物理学家参与了研究。数月后，以尼玛·阿卡尼-哈梅德为主任的未来高能物理中心在北京成立，旨在帮助建立大型环形对撞机所需的物理案例。无论此类设备最终在地球上的何处建造，大家认为这种研究都是值得的。



未来高能物理中心于 2013 年 12 月 17 日在北京的成立仪式。该中心旨在规划该领域的未来，确定新对撞机的详细物理目标。照片左手边的是该中心主任、普林斯顿高等研究所的尼玛·阿卡尼-哈梅德，正与高能所所长王贻芳（图中右侧）为该中心的成立揭幕。后排自左至右依次是高能所前所长陈和生与加州大学圣巴巴拉分校物理学家、诺贝尔物理学奖得主戴维·格罗斯。（照片由高能所提供）

大家显然更倾向于这样的设备在中国成形，但需要强调，CEPC 与 SPPC 本身从来没有被设想成“中国对撞机”。实际上，该计划从开始就已明确，这是一台由中国主持的国际化设备，来自全球各地的物理学家将与中国同行一起工作、一起使用它。

同年年底，CERN 也启动了一项未来环形对撞机（FCC）的研究，该研究负责发展“LHC 之后雄心勃勃的加速器项目”。^[5]CERN 的物理

学家们也在仔细考虑一台全新设备的想法，将分两个阶段运行：正负电子机器和之后的质子加速器。作为备选方案，他们在考虑跳过第一阶段直接从开始就建造一台强大的质子加速器。（这一计划最初被称为“TLEP”，即三倍大型正负电子对撞机的缩写，这是因为该隧道预期的长度几乎是 LHC 和之前 LEP 隧道的 3 倍。）如果这些项目中的任何一个成为现实，LHC 就不会是“最终强子对撞机”，高能物理的未来在今后几十年内就会得到保障。

中国的大型对撞机项目的前景激发了物理学家娄辛丑的热情。娄辛丑当初从中国到了美国从事研究生学习与博士后研究，目前是德克萨斯大学达拉斯分校的物理学教授。1993 年，该校物理系为娄辛丑提供职位，以进行 SSC 的工作。但当他在 1994 年 1 月正式得到教职时，超级对撞机项目已经夭折。关于 SSC，他仅有的亲身经历是从沃克瑟哈奇废弃的实验室里拆除一些设备带回达拉斯。¹自 2012 年起，娄辛丑也在高能所任职，王贻芳邀请他担任 CEPC-SPPC 的项目主任。娄辛丑接受了该职位，他希望能帮助中国的探索取得成功，并同时避免一些导致 SSC 夭折的陷阱（包括经费超支和其他管理问题等）。他认为这一项目大有前途，因为他见到了极其投入的中国物理学家团队“致力于做真正的科学研究”，同时感觉到了来自基金主管部门及政府的支持性的回应。^[6]

以下是娄辛丑、王贻芳与同事们目前所提出的总体规划，虽然这个设计仍有一定的可塑性。最初的方案要求建造周长至少 50 千米的隧道，然而如果经费充足，真正的期望是建造 100 千米长的隧道。该隧道位于地下 50 ~ 100 米深处，其宽度为 6 米，因而足够容纳 CEPC 与 SPPC，以及一台固定在其顶端的“助推”加速器。该助推器的作用是将质子加速到注入高能环所需达到的能量。

1 沃克瑟哈奇 (Waxahachie) 为德克萨斯州偏东北部的小城，紧邻达拉斯。——译者注



物理学家娄辛丑在2013年高能所环形粒子对撞机的会议上发言。他正在协调在中国修建新一代巨型对撞机的各方努力。他工作于高能所及德克萨斯州立大学达拉斯分校。（照片由娄辛丑提供）

根据计划，在 SPPC 建造与运行期间，CEPC 仍将保留在隧道中。这两台加速器能同时运转，分别进行质子（或者更重的粒子如金离子）对撞和正负电子对撞。这样还可研究一些奇异物质形态，譬如夸克胶子等离子体，有人认为这种物质态存在于最初几微秒阶段的早期宇宙。

加速这些粒子的巨型隧道与 LHC 类似，大致呈圆形，但并非完美的圆环。实际上，它由 8 段圆弧（占周长的 85% 左右），以及 8 段较短的直线区域（占周长的 15% 左右）构成。其中 4 条“直线”包含相互作用区，装备有探测器，其中 2 个留给 CEPC，另 2 个留给 SPPC。在另外 4 个直线区域处，粒子被加速并注入到主环中。在弯曲隧道的大部分区域都填置有磁铁，它们使带电粒子的路径偏折。直线区域不需要

这些磁铁（因为不需要偏折），因而可以为探测器与其他关键设备留出空间。

首先将安装 240GeV 的正负电子机器（CEPC）。根据目前的日程表，经过5年左右的研发，CEPC可以早在2021年开建，并于2028年开始运行。与此同时，SPPC的研发将在2015—2030年进行。这项工作的核心任务是为机器准备好高强度的超导磁铁。工程设计工作将继而在2030—2035年开展，实际建造从2035年持续到2042年。如果此进度表如期实现，那么数据采集将从2042年开始。

路途漫长其实是有利因素，因为中国需要一段时间为其有史以来第一台强子对撞机做准备。从CEPC起步是相当明智的选择，因为正负电子对撞机造价更便宜，而且还能发挥中国自1988年以来在北京正负电子对撞机上获得的专长。

“环形对撞机与直线对撞机互为补充，各有千秋，”CERN的物理学家法比奥拉·查诺蒂说。^[7]这说明，CEPC与国际直线对撞机（ILC）皆可为高能物理做出重要贡献。

CEPC这类环形对撞机可以制造10倍于直线对撞机的希格斯玻色子，这意味着它能够产生更多数据。^[8]另一方面，ILC的初始运行能量为500GeV，升级后可达1TeV。据高能所的物理学家高杰说，“其优势在于可以达到更高的能量”，因而可寻找除希格斯之外的更多粒子。此外，直线对撞机的能量可被进一步升级，而环形对撞机一旦建成就无法扩展，除非建造一条全新的隧道。高杰补充道，直线加速器的缺点之一是“一般只有放置一台探测器的空间。在加速器中我们通常希望有两个或更多的探测器来做交叉检验。”LEP有4个相互作用点，LHC亦然，CEPC按计划也有4个对撞点。高杰指出，ILC有可能安置不止一个探测器，“但是ILC上的探测器只能轮番上阵，这就不太方便。”^[9]

未来对撞机探索新物理

至于 CEPC 及其后的 SPPC 可能做出的物理结果，我们不打算重述第 3 章已经涉及的内容。不过这里将回顾若干重点，同时会提及某些尚未强调的问题。对于一台最终可达 100TeV 的新加速器，我们所能列举的科学价值与重要性，绝不亚于人们在建造 LHC 之前所列举的。不过，现在的理由肯定更为微妙。LHC 有时被称作“必赢加速器”。很多科学家充满信心，认为 LHC 在其设计能量区域必能看见希格斯玻色子或其他给予基本粒子以质量的东西。^[10] 这种信念的来源之一就是所谓的“必赢定理”，据此定理，这台加速器实际上就是你在物理学上取得成功的保障。

这个思路的大致要点是：质子对撞在 LHC 上有时会产生一对 W 玻色子，而这些 W 玻色子偶尔又会彼此对撞。在一个没有希格斯玻色子的理论中，两个 W 玻色子对撞的概率会出毛病：它随着对撞能量持续增大，最终会大于一。无论是在物理中，还是在现实世界里，概率大于一的事件都荒谬离奇，根本不可能发生。如果在你的计算过程中冒出这样的东西，就说明你的理论出了问题，至少需要修补。

希格斯玻色子可以挽救这一局面，它能保证 W-W 散射的概率维持在远小于一的水平。不过计算表明，只有质量小于 800GeV 的希格斯才能做到这一点。按照设计，LHC 就是用来寻找质量在大约 1000GeV（即 1TeV）之内的粒子的，因而该对撞机几乎肯定可以做出新发现——或者发现寻找已久的希格斯粒子，或者发现甚至更加不同寻常之物。无论如何，LHC 几乎注定会揭示某种有趣的物理。^[11]

“然而 100TeV 对撞机并不存在这种必赢方案，” CERN 总干事罗尔夫·霍伊尔说。^[12] 不过，他相信仍然能够为建造该机器提供很强的理由，即使这些理由无法像 LHC 的先例那样被总结成 5 个字——发现希格斯。

这是因为，即使物理学家已经最终将希格斯玻色子拿到手，他们也还不能理解所得之物究竟是什么。在 2012 年发现希格斯之后，人们一面渴望对其详加研究，一面期望有机会探索与之相关的种种奥秘。非同小可的问题是，为什么希格斯场“弥漫全空间，触及所有粒子且给予其质量，” SLAC 的物理学家迈克尔·佩斯金说。对于与这种场相关的难题，寻求其解决线索的最佳方式就是精确细致地研究希格斯玻色子。^[13]

事实上，这正是 CEPC 计划的一个核心任务。CEPC 将能产生数以百万计的希格斯粒子，物理学家因而能够无比清晰地观察它与其他粒子及与其自身的相互作用，还能观察 LHC 灵敏度无法企及的稀有衰变过程。统计数据量的增大也使物理学家能够更精确地测量希格斯质量，而这有助于更精确地预测各种衰变模式与产生率。然后，研究者将寻找偏离标准模型预言的任何信号。通过由此所得的数据，他们就能为希格斯构建更完整的图像，从而帮助理解这个玻色子究竟是否基本、是否藏有更多隐蔽的微观结构，以及在其各种衰变模式中是否还会出现新粒子或作用力。

SPPC 研究者将对这些物理问题做进一步研究，此外还会关注一些新问题。其中首要的是，新的质子对撞机会把我们带往搜寻新粒子的前线。这些新粒子既可能如同超对称或暗物质理论的预言，也可能与之毫无关联，突如其来而令我们猝不及防。研究者也将有机会理解正反物质不对称及其起源，同时有机会深入了解引发电弱对称性破缺的相变过程。所有这些问题在我们认识宇宙的过程中都至关重要，它们彼此亦紧密相关，甚至可被视作同一问题的几个方面。

SPPC 的质心系能量是 LHC 的 5 ~ 7 倍，这使科学家能够搜寻的基本粒子质量较 LHC 的能力高 5 ~ 7 倍（除非假定 LHC 还会继续升级）。^[14]对于某种 LHC 可少量产生的粒子，其在 SPPC 上的产率可高出千倍，从而将分辨率提升 100 倍。假如能够发现这些粒子，则其中至少会有一

些可能与超对称的概念相关。超对称模型通常预言 100TeV 对撞机应能找到顶夸克的“超伴子”——“标顶夸克”（stop），因为它能将该粒子质量的搜寻范围提升至 8TeV 左右。^[15]

寻找“标顶夸克”的挑战之一是，它的实验信号与顶夸克很像。杜克大学的物理教授阿舒托什·考特瓦尔（Ashutosh Kotwal）目前在费米实验室工作，他还是建造新一代质子对撞机国际合作方面的美国协调员。考特瓦尔觉得这很有讽刺意味：“那个 [于 1995 年在 Tevatron 上被发现时] 为我们带来无数欢欣的东西现在又变成了毫无特征的背景，我们只得从中挑出它的超对称伴子。”考特瓦尔说，这是衡量此研究进展的一种方式：“昨天的发现转瞬成为下一次发现的背景。”

搜寻标顶夸克的一般策略基于如下考虑：顶夸克既可能来自其（假想的）较重超伴子（标顶夸克）的衰变，也可能通过标准模型已有的机制产生。“因为你在看到从两种途径产生的顶夸克，这就成了难题，”考特瓦尔补充道。加之 LHC 已经制造了十亿量级的顶夸克，而 100TeV 机器将会制造更多。不过在这一大堆粒子中，他说，“一台 100TeV 的机器应当也能制造巨量的标顶夸克，因而我们能够极其深入地研究它们。”^[16]

发现顶夸克的超对称伴子，将预示着更多新发现的来临，因为这明显告诉我们，还有超过一打的其他超对称粒子有待发现。而且，其中应当包括一种人们特别珍视的粒子——最轻的超对称粒子。因为它原则上无法衰变成任何其他粒子，所以绝对稳定。这种粒子可能构成了宇宙中暗物质的主体。人们通常假定它是具有弱作用的重粒子（WIMP）。

SPPC 将促进对暗物质的搜寻工作，其方式已如第 3 章所述。例如，我们可以尝试产生标夸克（即夸克的超伴子）或者胶微子（即胶子的超伴子）。根据超对称理论，它们将持续衰变为愈来愈轻的超对称粒子。从而在一次对撞事件中，我们终将以“丢失能量”信号的形式观察到暗物质。不过像 SPPC 这样的质子对撞机也可能以粒子对的形式直接制

造暗物质。这里，超对称能给出物理学家试图寻找的候选粒子。其首要候选者是 W 微子，即假设的 W 玻色子的超伴子；还有希格斯微子，即希格斯玻色子的超伴子。

这或许提供了观察 W 微子与希格斯微子的最佳方式，因为“直接探测”实验的地下液氙池很难捕获它们。^[17] 此类地下探测器即使能发觉 W 微子与希格斯微子的某些蛛丝马迹，也不大可能提供这些粒子的更多性质。由此可见，在搜寻暗物质的众多方法中，高能加速器自有其独到之处。“对撞机所能做的是制造这些粒子，以重现宇宙诞生之初必曾出现过的场景，”考特瓦尔说，“通过对撞机你还能制造对撞产物衰变而来的次级粒子。这说明对撞机将大大扩展你的视野。”^[18] 此外，W 微子与希格斯微子很可能重达 1TeV，这超出了 LHC 的视野，却完全在 SPNC 的能力范围内，因而后者成功的可能性就更大。^[19]

该机器亦将深入其他暗物质候选者的领地。高等研究院的内森·塞伯格说，尽管在这方面鲜有保证，但是“有明显迹象表明暗物质存在，且很可能就出现在我们正打算探索的能区中（上达 100TeV 左右）。”^[20] 当然，在加速器上制造暗物质粒子只是第一步，佩斯金补充说，“为了证明在对撞机上观察到的粒子的确是（充满宇宙的）暗物质粒子，我们仍需要在星系中或在撞向地球的粒子中观察到它。”^[21]

SPNC 还能揭示另一个紧迫问题的重要线索，即正反物质不对称的起源问题。根据标准模型，宇宙不应由正物质主导，而是应当有等量的正物质与反物质，它们终将相互碰面相互湮灭，使宇宙中的一切化为乌有。但是我们存在于其中，立足于大地极目于苍穹。而且在我们巡查过的一切区域中，都几乎没有什么反物质。由此产生了疑问：究竟怎么了？

1967 年，苏联物理学家、诺贝尔和平奖得主安德烈·萨哈罗夫（Andrei Sakharov）提出一种理论，解释了为何“宇宙关于正反物质粒子数不对称。”^[22] 他指出，如果满足三个条件，宇宙就能从正反物质等量的状

态演化到物质主导的状态。第一个条件是,自然界中必须有能够改变“重子数”的过程。按照定义,重子数是重子(如质子和中子)的数目与反重子(如反质子与反中子)的数目之差。由于重子是3个夸克结合而成的束缚态,反重子是3个反夸克结合而成的束缚态,因而重子数也能被定义成夸克数(即夸克的数目减去反夸克的数目)除以3。其结果对于单个重子(由3个夸克组成)来说就是+1,对单个反重子(由3个反夸克组成)来说是-1,对于介子(由一个夸克与一个反夸克组成)则是0。

如果宇宙在初始时刻包含等量的夸克与反夸克,那么其初始重子数必为零。不过,如果正物质主导了当今的宇宙,正如我们所见,那么总的重子数必为非零,而且为正。导致这种后果的唯一途径是,某些自然过程改变了重子数,也就是说,重子数并不守恒。举例言之,改变重子数的一种方式假设质子与反质子并非完全稳定。某些超对称与大统一理论预测质子实际上的确会衰变,但是至今实验中从未观察到这种现象。(或许我们只需为此多等一些时间,但也可能是那些理论本身出了问题。)

萨哈罗夫条件之二认为,自然界必有所谓CP破坏的过程,它们区分正物质与反物质。某些实验,包括涉及中性K介子的实验(见第4章),已经说明此类过程的确存在。2004年,SLAC的BaBar合作组与日本KEK实验室的Belle合作组在中性B介子的衰变中直接观测到了CP破坏。中性B介子包含一个反底夸克与一个下夸克。根据BaBar团队的测量,B介子中出现的CP不对称比K介子强100000倍。^[23]这些发现使理论家相信CP破缺应比目前已见的部分更为普遍,而且很可能也会出现在其他粒子的弱衰变中。另一些实验,如中微子实验,正积极探索这种可能性。

萨哈罗夫条件之三,亦即三者中的最后一个,是说重子数不守恒的过程必须发生在宇宙未达热平衡的时刻。物理学家于是提出,正反

物质等量的初始状态可能会在希格斯场到处获得非零值所引起的电弱对称性自发破缺的相变过程中被破坏。据理论家推测，在电弱相变时可能发生过的一种重子数破坏的过程是，将两个质子剧烈压缩，使之转变成一个反质子与一些轻子。^[24] 在此相变之后，一切都不可挽回地改变了：物质主导了世界，此前统一的电弱力分裂成两种力，而原来彼此不可分辨的电弱力的荷力粒子们从此变得不再相同。

如果萨哈罗夫三条件在实际情况中得以满足，那么电弱相变就必须是“一阶”的。所谓一阶相变，就像水的沸腾，是指物质状态的一种戏剧性突变。这是一种远离平衡态的过程，它朝着单一的方向发生，不易被逆转。这种过程的不可逆在萨哈罗夫的论断中具有核心地位。否则，正反物质不对称性一旦出现就会被抹去而不是被保留。

种种迹象将物理学家的注意力引向了电弱相变。在宇宙演化的历史中，正反物质不对称可以发生在电弱相变时刻（不过还有很多其他假想方案，各有诱人的特点）。或许正是在这短暂的间隔，宇宙偏离了平衡状态，导致了正反物质的不对称。如果在这相变过程中，物质仅比反物质多出一点点，它们就能抹去反物质的所有痕迹，正如我们目前所见。唯一的难题是，根据标准模型，目前测得的希格斯玻色子质量，即 125GeV 左右，与一阶相变相冲突。事实上，标准模型告诉我们，如此质量的希格斯将导致更为平滑更为连续的“二阶”相变。

这倒不至于功亏一篑。考特瓦尔说：“我们只需在标准模型的图像中对希格斯稍事修改，就能导致宇宙发生一阶相变，从而造成正反物质不对称。”对希格斯性质做细微的修改，就足以使平衡向正物质一方移动。而为了探测这细微的修改，我们就需要精确测量。^[25]

如欲探测偏离预期的可能性，最佳方式之一是研究希格斯粒子自相互作用。三点相互作用，即一个希格斯粒子入射、两个希格斯粒子出射的过程，尤其能够揭示这一点。佩斯金认为，三希格斯耦合令人着迷，“因为预言一阶相变的希格斯模型通常也预言三希格斯耦合常

数有大的偏离。”不过，他补充道，这个耦合常数比希格斯的其他耦合常数要难测得多。^[26]

标准模型预测了希格斯粒子的自相互作用应当有多强。在此模型中仅有一个希格斯粒子，但是如果我们修改之，允许更多而不只是一种希格斯粒子发生相互作用，那么我们观察到的自作用强度就会改变。超对称就是此类模型的一例。科特瓦尔提到，如果有第二个或者更多的希格斯粒子，一台 100TeV 的对撞机就应该能够制造之。他说：“我们知道，很容易修改理论以包含两个或更多的希格斯，从而实现一阶电弱相变。而这种修改的理论就能告诉我们，我们缘何在此，反物质为何没有抹去一切。”

所以，100TeV 机器将解决至关重要的问题。我们希望理解希格斯粒子及相关的希格斯场。若非它们的存在，原子分子，以及由之构成的所有物质，都不可能成形。我们还有机会发现暗物质的身份。大多数理论认为，若非它们，恒星、星系和我们人类都不可能出现。我们的存在同样依赖于正物质主导宇宙的事实。尽管当前理论还无法解释为何如此，但这个谜团或许很快就能被解开。“这都是极其重要的问题，解答它们将使我们对宇宙的认识发生飞跃，”考特瓦尔断言，“当你面临所有这些难题，就不禁要问，‘我们能多快地解决它们？我们能多快得到新的对撞机，以帮助我们解开那些巨大的宇宙之谜？’”^[27]

只可惜，至少从 CEPC 与 SPPC 的角度看来，我们仍然需要等待，因为该项目在眼下还是未经落实的构想。为了推进这一项目，我们不仅需要竭尽全力，还需要力求全面系统地进行。因为想要做出好的科学，特别是高能前沿的科学，不宜仓促行事。

关于中国对撞机的当前状况，来自 9 个国家 57 个研究所的 300 多位科学家于 2015 年 3 月完成了初步概念设计报告，并在国际评审委员会审查后公布。这份 3 卷共计 600 多页的报告讨论了加速器与探测器的技术细节，同时确定了 CEPC 与 SPPC 要回答的首要物理问题。还讨论

了相关的工程问题。譬如，据娄辛丑说，“我们可能从基础设施方面调查建造隧道的需求。例如机械通风的要求如何？”他与同事不仅需要回答这些问题，还要找出在预研阶段必须回答的关键性技术问题。“这是我们必须经过的非常重要的阶段，从而使我们自己、学术界和政府确信，我们能够将该项目向前推进，”娄辛丑说。^[28]

目前，国际评审已对该报告给予积极评价。诺贝尔物理学奖得主戴维·格罗斯曾数十次造访中国，并与领头物理学家和政府官员会面。他说：“初步概念设计报告很棒，阐述了基础物理的现状，描绘了这台机器的蓝图。对于一项尚未批准也没有得到研发资助的项目来说，已经完成的工作量很令人吃惊。我对此充满希望，重要的是尽快把方案提交考虑。”^[29]

CEPC-SPPC 团队成员们已于 2015 年 4 月 15 日向中国政府递交了一份提议，寻求 5 年的研发支持，他们现在正等待回应。5 年的周期不仅为解决关键细节问题留出了时间，而且为查看 LHC 第 2 期运行结果提供了机会。LHC 自 2015 年 6 月起开启了第 2 轮运行，并很快将能量提升到了 13TeV。

了解 LHC 即将看到的和没有看到的，将对中国对撞机的日程产生重要影响。如果在日内瓦发现了新粒子，那么 100TeV 机器就能产生更多的这种粒子。而且很可能还有其他粒子潜伏在 LHC 无法触及的能量区域里。另一方面，如果第 2 轮运行没有发现新粒子，那么探索 14 ~ 100TeV 能区就变得更为紧迫，因为这将为解决希格斯发现带来的谜团提供线索。

其他对撞机计划

中国对撞机并非人们眼下在考虑的唯一方案。2013 年 9 月，ILC 完成了一份 5 卷本的设计报告，叙述了加速器与探测器的设计细节、预期性能与设备花费。随后的报告着眼于日本北部北上高原的选址。^[30]“设

计已经完成，他们现在准备好开始动工了，”热心倡导该项目的佩斯金说。虽然 ILC 目前远远领先于其他未来加速器方案，但它仍未得到来自政府与财政的完全支持。佩斯金指出，在日本取得国家的一致同意“将是非常缓慢的过程。”^[31]

与此同时，CERN 正在规划自己的正负电子对撞机。紧凑直线对撞机（CLIC）将长达 50 千米。它使用了最新的加速技术，对撞能量可达 3TeV。虽然 CLIC 比初始运行能量为 500GeV、最终可升级到 1TeV 的 ILC 体积更大能量更高，但 CLIC 起步未久，目前仅达到概念设计阶段。

按照最初的提议，恰如其名的“非常大型强子对撞机”（VLHC）将坐落在北伊利诺伊州的费米实验室附近，在其周长 233 千米的环形隧道中，质子对撞能量可达 175TeV。一份 272 页的正式“研究规划”于 2001 年 6 月完成。^[32] 次月，在科罗拉多的斯诺玛斯举行的一次会议上，费米实验室技术部前主任彼得·莱蒙（Peter Limon）就此做了报告。从那以后，对该方案的讨论断断续续地进行着。^[33] 虽然 VLHC 在此期间无甚进展，但这种可能性也并未完全消失。2013 年 11 月，美国政府顾问团尝试概括希格斯发现之后这一机器的物理价值。在此之前，佩斯金提出了一种显著精简的方案，即具有 80 ~ 100 千米隧道的 100TeV 对撞机。^[34] 不幸的是，VLHC 作为美国的高能探索方案没有得到认真考虑，或许这也反映了该国在高能粒子物理项目方面的休眠状态。

另一方面，由 CERN 支持研究的未来环形对撞机（FCC）方案则比 VLHC 更为切实可行。CERN 经营着世界上最大和最富成效的粒子物理实验室。与中国方案类似，FCC 是一台环绕日内瓦的环形对撞机，其直径在 80~100 千米之间，产生对撞的能量可达 100TeV。FCC 团队预期将在 2018 年之前向欧洲未来加速器委员会提交概念设计报告。

比萨大学的物理学家、LHC 的 CMS 团队成员吉多·托内利（Guido Tonelli）相信，无论 LHC 在今后几年会发现什么，尽快推动新的对撞机都很重要。“如果 LHC 在下一轮运行中没有发现，我们就得继续向

更高的能量推进，因为在那里，我们将有可能回答目前仍然悬而未决的大问题，”他说，“如果我们真的发现了什么，在 LHC 上也许 [只] 能看到 ‘恐龙的尾巴’，所以我们需要一台能量更高的机器以看见整个动物。我们尚不知道下一台加速器的细节，但对这样一台加速器的需求则是明确的。”^[35]

FCC 这样可以接受的计划对于中国对撞机方案并不构成威胁，反而会使中国项目受益。“有其他方案出来是有益的，”王贻芳说，“这就向我们的政府展示了国际上对此类项目兴趣浓厚。若无竞争，就没有前进的紧迫感。”一旦发生停滞，对整个领域将是有害的。^[36]

内森·塞伯格也同意竞争是健康的。“从物理学的前景看，一台机器是必要的，不过若有两台而非一台机器则要好得多。从历史中我们已经看到，一旦有两台独立的机器，进步就更快，结果就更可信。”作为例子，他提到了肇中与伯顿·里克特在两台不同的机器上使用两种不同的技术发现了 J/ψ 。“毫无疑问，他们看见了相同的信号。”^[37]

然而，世界上是否有同时运行两台 100TeV 质子对撞机的足够财力与技术专家，这一点仍然存疑。阿卡尼－哈梅德乐于看到建造多于一台的新对撞机，但是他希望欧洲与中国最好不要重复彼此的工作。“该领域的最佳状态是，世界上的每个地区的每个团队，都能为推进该领域的进步而尽其所能地尝试最有雄心的事情。而在目前，这就是中国所能做的最具雄心的事情。对于欧洲与美国则未必如此，因为他们已经建造过此类的大型机器。”^[38]

不过，所有这些项目都面临挑战。根据大多数的看法，ILC 已经预备启动，等待多时，只是缺乏政治上的决策。至于说任何能建造 100TeV 机器的机构，那么 CERN 显然责无旁贷。不过，其人力物力在今后 20 年里仍将集中在 LHC 上，这对于启动一个全新的大型项目来说是一种束缚。据 CERN 前总干事卢察诺·迈安尼说，这个 100 千米隧道的选址“并不完美”，他说，“其中一边是山另一边是湖，不过或许

也能做成。”^[39] 中国也面临其自身的挑战，虽然性质不同，但程度不差。简而言之，中国此前从未承担过大规模加速器项目，对于高能质子对撞机也没有任何经验。最后，遗憾的是，VLHC 作为美国主导的方案，看来希望渺茫，因为该国计划将中微子研究作为粒子物理项目的核心（除了目前参与 LHC 研究的 1700 多位美国科学家之外^[40]）。

总而言之，佩斯金认为“这些机器中何者将会实现，仍然非常不确定。”他说，主要问题并不在于技术可行性，而在于是否有任何政府愿意为这样大规模的项目提供必要的经费支持。“如果你无法确定哪条路通向目的地，那么每条路都要试着走。”^[41]

历史经验充分印证了这一告诫。20 世纪 80 年代末，CERN 决意建造 LHC。当时，规模更大的 SSC 也正准备开建，于是有意见认为 LHC 其实无关紧要。特别是几年之后 SSC 项目告吹，CERN 继续推进 LHC 的决定最终被证明是明智的。与此情形相似，乌特勒支大学的物理学家、诺贝尔奖得主杰拉德·埃图夫特说，即使中国决定建造新的对撞机，“CERN 继续按计划前进也是明智的。我们最终可能会有两台机器，但这没有什么不好。”LHC 与 Tevatron 项目曾同时运转了数年，使科学从中受益。多数粒子物理学家乐意再次看到这种局面。^[42]

规划 CEPC 与 SPPC 的蓝图

某种程度上，推动新对撞机的中国研究者们正在等待来自政府部门的回应，他们要知道政府是否会资助这一研究计划。但这并不是说，在做出决定之前，该项目只能搁置。王贻芳说，他的团队在此期间仍会就机器设计与相关的物理问题继续工作。他们希望在几年内将初步概念设计报告升级为概念设计报告。但在达到这一目标之前，还需要解决很多细节问题。

需要解决的首要问题是如何确定该设备的规模：隧道全长 50 千米还是 100 千米，抑或介于两者之间？与此相关，质子对撞机将达到

70TeV 还是 100TeV？目前选项很多。王贻芳说：“我们需要在实际项目开始前缩小选择的范围。”^[43]

领导香港科技大学高等研究院的戴自海推荐说，“中国需要大胆一些。”如果该项目继续推进，他敦促中国建造一条周长至少 100 千米的大隧道，因为国内土木工程的成本相当低，远低于很多西方国家。修建大隧道就意味着对撞能量可随超导磁铁技术的进步而持续提升。“修建排名第二的机器目的何在？”戴自海问道。“在我们这个领域，第二好就是不够好。”^[44]

佩斯金对此表示同意，他鼓励中国利用其优势将隧道建得尽可能大一些。^[45] 他相信这是实现 100TeV 对撞最节省成本的方式，因为要达到同样的对撞能量，越短的隧道就需要越昂贵的磁铁。

审阅初步概念设计报告的国际评审委员会也做出了相似的结论，他们鼓励 CEPC-SPPC 团队立大志向，想大问题。评审委员会写道，如果该项目被批准继续进行，它就将成为“全世界高能物理学今后 50 年的首要机器。因此该机器不能是二流项目。”^[46]

在与世界各地物理学家的交谈中，阿卡尼-哈梅德听到了几乎完全一致的观点。他们告诉他：“50 千米固然好，但 100 千米就会改变整个进程，会瞬间改变粒子物理的景观。鼓起勇气迈出这一步，现在是时候了。”^[47]

不过在迈出这一步之前，还有很多事情要做：明确主要的技术困难，制定详细的选址方案，处理相关的人力问题，等等。SPPC 最大的技术挑战关乎超导磁铁。在强子对撞机上，磁铁将束流弯曲并聚焦。而最大束流能量就正比于磁铁的强度。目前，LHC 装备的最为强大的超导磁铁使用铌钛超导材料，其磁场的强度约为 8 特斯拉。为了获得 100TeV，SPPC 就需要强度达到 20 特斯拉且持久可靠的超导磁铁。这种磁铁很可能将使用铌锡合金。该材料易碎而难于处理，但可以产生更

强的磁场。中国物理学家在测试这种材料时，已能在实验室中产生 12 特斯拉的磁场，而劳伦斯伯克利国家实验室已能产生 16 特斯拉以上的磁场。^[48]“我们希望达到 20 特斯拉，不过我们还有 20 年来实现这个目标，”王贻芳说。^[49]而且，技术不会自动进步，他指出，“你需要一些因素来驱动它。而以往的大型高能物理项目对驱动技术发展做出了很大贡献。”^[50]

LHC 人员在初步计划阶段也曾面临相似的问题。1983 年，当时在 CERN 的两位物理学家斯蒂夫·米尔斯（Steve Myers）与沃尔夫冈·施内尔（Wolfgang Schnell）认为，实现最大束流能量需要 10 特斯拉的磁铁。但那时还没有这种磁铁，因此米尔斯与施内尔写道：“这不是短期内可实施的项目……在技术成熟前不应考虑它。”^[51]

简言之，如伦敦大学学院的物理学家、LHC 的 ATLAS 成员姜·巴特沃思所说：“他们并不知道如何制造，但他们得着手自行研发，否则这种技术就永远不会存在。建造这类机器，你不只要利用现成的前沿技术，还得自己开发新技术。”^[52]同样，中国加速器项目很可能会直接或间接地推动超导磁铁技术及其他所需新技术的发展。

除了加速器怎样建造的问题，人们还得应付加速器应置于何处的问题。在科研工作者投身于技术研发的同时，另一些工作者正努力寻找新的中国对撞机的最佳地址。在参观和勘测了不下 14 个地点后，一个备受青睐的选址清晰地浮现了出来，即北京以东 300 千米处的港口城市与度假胜地秦皇岛附近区域。

该选址的最大亮点在于有利的地质条件。黄河工程咨询公司在该地区开展的大范围勘测确定了这一点。此处地下覆盖有足够厚的花岗岩层，这为建造隧道提供了最节省成本的选项。地动测量同样说明该岩石层在技术上是稳定的。事实上，据高能所的物理学家秦庆说，其他备选地址的地面运动比这里要强 10 ~ 100 倍。^[53]如果物理学家要达到必要的测量精度，隧道就不能有可觉察的移动。为了证实地质上合适，

以及找出任何地下蓄水池,还需要钻很多洞。“我们希望确保万无一失,”王贻芳说。^[54]



鸟瞰超级质子对撞机 (SPPC)、也被称为“巨型对撞机”的候选位置。最左边的红点是抚宁县城,最右边的红点是秦皇岛市区。最大的圆环标示了直径 50 千米的隧道,而几个小圆环则是 SPPC 的助推器。(照片由高能所提供)

秦皇岛的另一个优势是紧邻北京,其间驾车只需 3 小时,而火车只需 2 小时。秦庆说,明年应能开通的高铁将使行程进一步缩短到一小时。^[55]此外,该地区对于国外科学家来说也颇具吸引力。与北京和中国其他工业化地区相比,其空气质量相当好,气候相对温和。其许多海滨在国内名列前茅,有时被称为“中国的夏季之都”。^[56]其郊野的丘陵与田园村落使人想起加利福尼亚州或意大利的某些地区。此地有中国顶级的葡萄园与农场,种植有多种农作物。这里看来有建造实验室与科学家住房的大量空间,而且当地政府到目前为止对该项目也高度支持。

尽管地方政府响应积极,王贻芳说,仍需正式拿到这片地区,并得到开工建设所需的一系列许可。此外,为了得到社会各界的支持,还需要做大量的工作。为此,他与同事们组织了各种论坛,将该项目介绍给公众。^[57]

这些活动作为未来一项更广泛运动的一部分，是为了使全国各地的人们对高能物理产生兴趣。或许更为急迫的任务是鼓励学生进入该领域，因为今后的高能物理事业极其需要他们。阿卡尼－哈梅德认为，与发展超导磁铁的关键技术相比，培养足够数量的专业人员或许才是更大的挑战。为了支持这种规模的项目运行，中国的物理人才培养项目需要按 8% 的速度在今后若干年持续扩大。^[58]

项目主任娄辛丑表示赞同：“我们最重要的工作之一，就是激发年轻人进入该领域的热情，使他们最终无论在科学方面还是工程方面，都成为该项目的支柱。因为，这说到底还是他们的项目。他们才是将这一项目进行到底的人。”^[59]

历史上，吸引人们参与某一科学领域往往就是通过规模大、关注度高的项目来捕获公众的想象力。阿波罗载人登月任务就是一例。当然，阿波罗项目绝不只是将一个或几个人送上月球，它还大大推动了整个美国科学事业的进步。很多人感到，新对撞机也能扮演类似的角色。“对中国而言，这堪与载人登月项目媲美，甚至有过之而无不及，”阿卡尼－哈梅德说，“虽然公众对登月很着迷，但它对科学贡献不多。而对撞机的前景更为广阔，它将为我们理解宇宙如何运行提供关键的知识。”^[60]

中国需要在国内开展全面的人才招募计划，同时需要在国际上广泛召集合作者。不过在此之前，CEPC-SPPC 团队必须等待，至少要得到政府的初步许可。然而对于阿卡尼－哈梅德及整个团队来说，很清楚的是，“如果我们能得到一台 100TeV 对撞机，就需要全世界——全世界的聪明人才——参与合作。”^[61]

他的同事——高等研究院院长罗伯特·戴格拉夫对此完全赞同。他说：“只有整个科学界协调一致，才能将如此规模的项目成功运作起来。我认为中国有能力牵头并投入资源，同时确保国际参与。”^[62]

中国科学家们不仅欢迎国际合作者加入，而且他们在国际合作中也正变得愈加如鱼得水。随着时间推移，中国已经通过 BESIII 加速器实验、大亚湾及 JUNO 中微子实验取得了国际物理合作的经验。据王贻芳说，BESIII 有大约 1/3 的国际科学家，大约一半的大亚湾物理学家来自国外，而 JUNO 的科学家中将有超过半数来自国外研究机构。他说：“这些项目正变得愈加国际化。我们的科学家为此感到高兴，而政府也乐见其成。”^[63]

一旦时机成熟，美国物理学界参与这个基于中国的加速器项目应该没有问题。戴维·格罗斯说：“这对美国物理学家来讲是加以利用的绝好机会，因为我们国家既没有可与此比肩的机器，也没有建造这种机器的计划。对于超级对撞机，我们可为中国做很多贡献。”——比如在质子加速器及超导磁铁方面的专长——“而且美国的高能物理界也会从该项目中大大受益。”^[64]

卢察诺·迈安尼认为像中国这样的大国参与进来，对高能物理的发展有积极意义。他指出，目前的布局“将所有项目都立足于欧洲对于我们的领域来说不是最健康的状态。”^[65]戴格拉夫补充说，通过建立欧洲、亚洲与美国间的平衡，亚洲将使该领域的基础更为健康稳固。^[66]

目前，预测国内外高能物理的走向与前景还为时过早。说到底，这都归结于决心问题，格罗斯说。他相信“中国有决心有能力做这件事。”中国的经济增长已经走到了这个位置，能够承担其他很多国家根本无法考虑的对撞机项目。^[67]

过去一年里，阿卡尼-哈梅德几乎每个月都往返于中美两国之间，他为自己的所见所闻感到振奋。“从我在中国各地感受到的探险精神，我认为该项目前景明朗。使我最为激动的是这个国家想做大事的决心和大业可成的信心。”^[68]

在此项目中与他共事的王贻芳也看到了希望，各个关键因素正在整合起来。首先，经济仍在增长。中国的国民生产总值（GDP）在未来 10 年内有可能达到世界第一。据王贻芳估计，CEPC 与 SPPC 的花费与 GDP 之比大约为 1/10000。与 LHC 和 LEP 相比，甚至与建于 20 世纪 80 年代小型的北京正负电子对撞机（BEPC）相比，这一比值都只少不多。在他看来，这些数字说明巨型对撞机所占的 GDP 比例与先前的各种加速器符合，因而谈不上过分。^[69]

另一个重要的推动因素是，BEPCII 大约将在 10 年之后停止运行。为填补该空缺，中国就需要新的高能物理项目。“所以我认为时机正好，”王贻芳说。^[70]

虽然他不能左右中国政府的内部决策，更别说国外的境况，但他仍然相信“这个愿望最终实现的可能性非常大。我的同事与我自己都愿意为之倾注全力，竭尽所能。”尽管对撞机的前景并不明确，但他并不悲观。“如果你有一个绝佳的机会来做成这样的事情，你就尽管跳进去全力推动它，”王贻芳说，“我认为我们无须除此之外的任何其他理由。”^[71]

参考文献

- [1] Dennis Overbye. “Asking a Judge to Save the World and Maybe a Whole Lot More.” *New York Times* (online). March 29, 2008. <http://www.nytimes.com/2008/03/29/science/29collider.html?pagewanted=all>.
“First beam in the LHC.” *CERN Press Office* (online). September 10, 2008. <http://press.web.cern.ch/press-releases/2008/09/first-beam-lhc-accelerating-science>.
- [2] CERN. “Synchrotron Radiation.” *Taking a Closer Look at LHC*. <http://www.lhc-closer.es/1/4/12/0>.

- [3] Alain Blondel, et al. “Accelerators for a Higgs Factory: Linear vs. Circular” (HF2012). *Report of the ICFA Beam Dynamics Workshop*. February 15, 2013, arXiv: 1302.3318.
- [4] Yifang Wang (e-mail communication with the author), May 13, 2015.
- [5] “Future Circular Collider Study.” *CERN* (online). January 23, 2014. <https://fcc.web.cern.ch/Pages/About.aspx>.
- [6] Xinchou Lou, IHEP (telephone interview with the author), August 25, 2014.
- [7] Fabiola Gianotti. The Second Annual Large Hadron Collider Physics Conference. Columbia University. June 6, 2014.
- [8] Adrian Cho. “Mega-Doughnuts.” *Science* (online). February 6, 2014. <http://news.sciencemag.org/europe/2014/02/mega-doughnuts-cern-study-plan-100-kilometer-atom-smashers>.
- [9] Jie Gao, IHEP (interview with the author). August 6, 2014.
- [10] Michael Chanowitz. “What if there is no Higgs boson?” *ATLAS News* (online). November 30, 2011. <http://www.atlas.ch/news/2011/what-if-there-is-no-higgs-boson.html>.
- [11] Sean Carroll. “Why We Need the Higgs, or Something Like It.” *Discover* (online). June 14, 2011. <http://blogs.discovermagazine.com/cosmicvariance/2011/06/14/why-we-need-the-higgs-or-something-like-it/>.
- [12] Dennis Overbye. “An Ambassador for Physics Is Shifting His Mission.” *New York Times* (online). January 12, 2015. <http://www.nytimes.com/2015/01/13/science/departing-leader-of-cern-ponders-uncertainties-that-lie-ahead.html>.
- [13] Michael Peskin. “I want the ILC!” *International Linear Collider TV*. November 14, 2014. <https://www.youtube.com/watch?v=FilbgqMLIpU>.
- [14] The CEPC-SPPC Study Group. *Preliminary Conceptual Design Report: Physics and Detector*. March 2015, p. 9.

- [15] The CEPC-SPPC Study Group. *Preliminary Conceptual Design Report: Volume II — Accelerator*. March 2015, p. 31.
- [16] Ashutosh Kotwal, Duke University/Fermilab (telephone interview with the author), April 13, 2015.
- [17] The CEPC-SPPC Study Group. *Preliminary Conceptual Design Report: Physics and Detector*. March 2015, p. 39.
- [18] Ashutosh Kotwal, Duke University/Fermilab (telephone interview with the author), April 13, 2015.
- [19] The CEPC-SPPC Study Group. *Preliminary Conceptual Design Report: Physics and Detector*. March 2015, p. 39.
- [20] Nathan Seiberg, Institute for Advanced Study (telephone interview with the author), March 31, 2015.
- [21] Michael Peskin, SLAC (e-mail communication with the author), May 25, 2015.
- [22] A. D. Sakharov. “Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe.” *ZhETF Pis'ma*. 5 (1967), pp. 32-35. http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1643/article_25089.pdf.
- [23] “BaBar finds direct CP violation in B decays.” *CERN Courier* (online). September 5, 2004. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/29124>.
- [24] Henry Tye, Hong Kong University of Science and Technology (e-mail communication with the author), May 16, 2015.
- [25] Ashutosh Kotwal, Duke University/Fermilab (telephone interview with the author), April 13, 2015.
- [26] Michael Peskin, SLAC (e-mail communication with the author), May 25, 2015.
- [27] Ashutosh Kotwal, Duke University/Fermilab (telephone interview with the author), April 13, 2015.
- [28] Xinchou Lou, IHEP (telephone interview with the author), August 25, 2014.

- [29] David Gross, University of California, Santa Barbara (telephone interview with the author), April 16, 2015.
- [30] “Status of the project.” *International Linear Collider*. <https://www.linearcollider.org/ILC/What-is-the-ILC/Status-of-the-project>.
- [31] Michael Peskin, SLAC (telephone interview with the author), March 31, 2015.
- [32] Giorgio Ambrosio, et al. “Design Study for a Staged Very Large Hadron Collider.” *Fermilab-TM-2149*. June 4, 2001. <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-r-591.pdf>.
- [33] James Glanz. “Physicists Unite, Sort of, on Next Collider.” *New York Times* (online). July 10, 2001. <http://www.nytimes.com/2001/07/10/science/physicists-unite-sort-of-on-next-collider.html>.
- [34] Eugenie Samuel Reich. “Physicists plan to build a bigger LHC.” *Nature*. 503 (November 14, 2014), p. 177.
- [35] Roland Pease. “CERN considers building huge physics machine.” *BBC News* (online). February 18, 2014. <http://www.bbc.com/news/science-environment-26250716>.
- [36] Yifang Wang, IHEP (telephone interview with the author), April 3, 2015.
- [37] Nathan Seiberg, IAS (telephone interview with the author), March 31, 2015.
- [38] Nima Arkani-Hamed, IAS (interview with author in Cambridge, Mass.), April 1, 2015.
- [39] Luciano Maiani, University of Rome (telephone interview with the author). April 22, 2015.
- [40] “U.S. Joins the World in a New Era of Research at the Large Hadron Collider.” *Brookhaven National Laboratory Newsroom* (online). June 3, 2015. <http://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=11734>.
- [41] Michael Peskin, SLAC (telephone interview with the author), March 31, 2015.

- [42] Gerard 't Hooft. Utrecht University (telephone interview with the author), April 24, 2015.
- [43] Yifang Wang, IHEP (telephone interview with the author), April 3, 2015.
- [44] Henry Tye (interview with the author at the Hong Kong University of Science and Technology), August 12, 2014.
- [45] Michael Peskin, SLAC (interview with author at IHEP), August 8, 2014.
- [46] The CEPC-SPPC Study Group. *Preliminary Conceptual Design Report: Volume II — Accelerator*. March 2015, p. 325.
- [47] Nima Arkani-Hamed, IAS (interview with author in Cambridge, Mass.), April 1, 2015.
- [48] Sarah Charley. “Test magnet reaches 13.5 tesla—a new CERN record.” *CERN* (online). November 18, 2013. <http://home.web.cern.ch/about/updates/2013/11/test-magnet-reaches-135-tesla-new-cern-record>.
- [49] Yifang Wang. “Daya Bay Neutrino Experiment and the Future” (lecture at Harvard University). December 2, 2014.
- [50] Yifang Wang, (interview with the author at IHEP), August 4, 2014.
- [51] S. Myers and W. Schnell. “Preliminary Performance Estimates for a LEP Proton Collider.” *LEP Note 440*. November 4, 1983.
- [52] Jon Butterworth. “The future of particle physics?” *The Guardian* (online). February 22, 2014. <http://www.theguardian.com/science/life-and-physics/2014/feb/22/the-future-of-particle-physics>.
- [53] Qing Qin, IHEP (interview with the author), August 7, 2014.
- [54] Yifang Wang, IHEP (telephone interview with the author), April 3, 2015.
- [55] Qing Qin, IHEP (interview with the author), August 7, 2014.
- [56] Xinchou Lou. “The CEPC-SppC Study Group in China: Introduction, Status and Future Plans.” February 24, 2014.
- [57] Yifang Wang, IHEP (telephone interview with the author), April 3, 2015.
- [58] Nima Arkani-Hamed, IAS (interview with the author at IHEP), August 8, 2014.

- [59] Xinchou Lou, IHEP (telephone interview with the author), August 25, 2014.
- [60] Nima Arkani-Hamed, IAS (interview with the author in Cambridge, Mass.), April 1, 2015.
- [61] Nima Arkani-Hamed. The Second Annual Large Hadron Collider Physics Conference. Columbia University. June 6, 2014.
- [62] Robbert Dijkgraaf, IAS (telephone interview with the author). April 20, 2015.
- [63] Yifang Wang, IHEP (telephone interview with the author). April 3, 2015.
- [64] David Gross, University of California, Santa Barbara (telephone interview with the author). April 16, 2015.
- [65] Luciano Maiani, University of Rome (telephone interview with the author). April 22, 2015.
- [66] Robbert Dijkgraaf, IAS (telephone interview with the author). April 20, 2015.
- [67] David Gross, University of California, Santa Barbara (telephone interview with the author). April 16, 2015.
- [68] Nima Arkani-Hamed, IAS (interview with author in Cambridge, Mass.). April 1, 2015.
- [69] Yifang Wang, IHEP (e-mail communication with the author). May 26, 2015.
- [70] Yifang Wang, “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, February 23, 2014.
- [71] Yifang Wang, IHEP (telephone interview with the author). April 3, 2015.

第 6 章

最神奇的意外收获

相传在 1854 年，时任英国财政大臣（后来成为首相）的威廉·格拉德斯通（William Gladstone）向迈克尔·法拉第询问其电磁感应实验的价值。格拉德斯通想知道，法拉第研究的电这种东西能否有任何实际的用处。据传法拉第回答说：“我不知道，不过我敢打赌你的政府有朝一日会对它征税。”^[1]

这个故事的真实性和发生的年份，以及所引述字句的准确性还有待商榷。不过它所表达出的观点无疑已被历史所证实。法拉第在故事中的声明透露了一种信心，那就是关于电这种物理现象的基础研究，乃至一般的基础研究，将来大多都会有实用价值，即使他无法精确地预知其实用价值究竟何在。这类探索或许要等几十年才有实际的回报，自然很难提前预知。

自 19 世纪 70 年代末起，英国乃至世界各地就逐渐将电力应用于街道照明。而正如法拉第所打下的“赌”，对电力交易征税很快也随之开始。不过更重要的是，他与詹姆斯·克拉克·麦克斯韦在 19 世纪中期的研究成就了统一的电磁理论，这为“电气时代”的到来开辟了道路，从而彻底改变了 20 世纪的人类生活。

1905 年，阿尔伯特·爱因斯坦在研究狭义相对论的过程中提出了著名的质能等价公式： $E=mc^2$ ，为核裂变提供了理论基础。此后，出生于

奥地利的物理学家莉泽·梅特纳（Lise Meitner）与奥托·弗里施（Otto Frisch）在 1938 年首次实现了核裂变。^[2]而对核裂变更戏剧性的演示则是 7 年后新墨西哥沙漠深处的原子弹爆炸。爱因斯坦质能公式也解释了核聚变所释放的能量。核聚变使太阳发光，为我们带来了氢弹，将来或许还能为我们提供大规模发电的新途径。

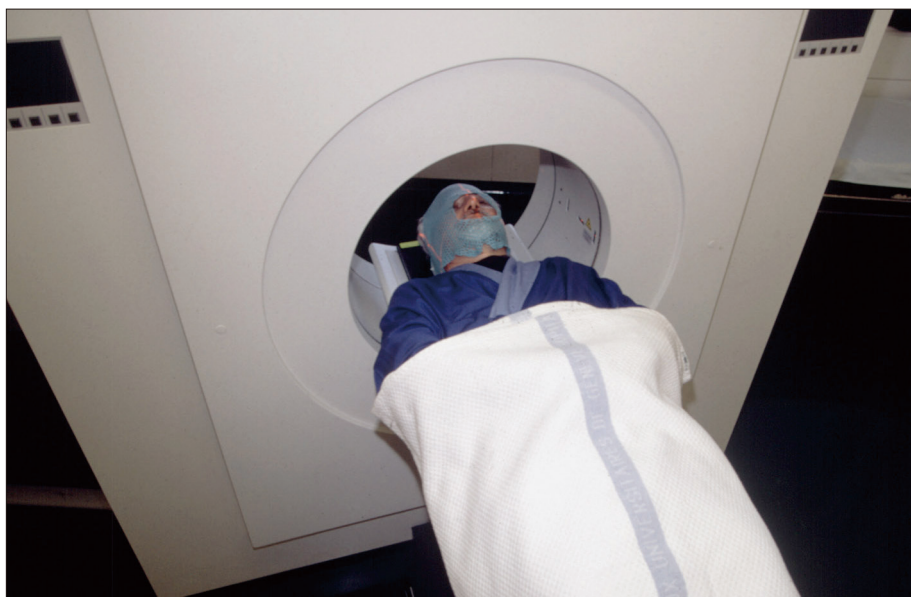
全球定位系统（GPS）自 1995 年开始全面运行。其精确性要归功于 70 年前，也就是 1915 年爱因斯坦创立的广义相对论。与此类似，物理学家戴维·格罗斯注意到，“量子力学这种 100 年前发展起来的高度抽象的理论，如今已成为现代技术的核心基础。”^[3]没有量子力学，我们就不会有传感器、集成电路、数字计算机、手机、LED、激光、蓝光播放器，等等一系列我们如今习以为常的设备。

这样的意外收获几乎总是不断涌现，物理学家斯蒂芬·温伯格说，“当我们拓展知识的边界时……这些新发现就把我们带向技术与智力的大成，从而又导致了其他的应用。”^[4]这些应用经常自发地出现，事先既没有按部就班的规划，也没有刻意的激发措施。它们只是发生了而已。

“基础科学引发了奇思妙想，并因之产生了未来的应用科学”，费米实验室主任奈哲尔·洛基耶指出，“没有基础科学，应用科学就会因失去源头而干涸。”换言之，亦如洛基耶所说，“基础科学是一切的未来。”^[5]

数十年来推动粒子物理发展的高能加速器技术将人类工程技术水平不断推向极限，促进了一大批技术领域的进步。这种技术影响的范围之广可从这个例子感觉到：根据牛津的物理学家菲利普·彪罗斯（Philip Burrows）统计，最初为解决基础物理问题而设计的加速器，目前世界上约有 25000 多台。但其中只有大约 0.5% 用于物理研究，而其余 99.5% 则被用于生物医学、工业等其他领域。^[6]

医学影像就是这样一种重要的技术产物。人们为了精确追踪并辨认粒子而设计的探测器，同样被证明是极好的人体探针。比如在 20 世纪 70 年代，CERN 的物理学家与日内瓦医院的研究者一道建造了第一台正电子发射型断层显像（PET）扫描仪，该设备可以观察人体内部组织器官的功能活动，目前已被应用于疾病的例行检查。

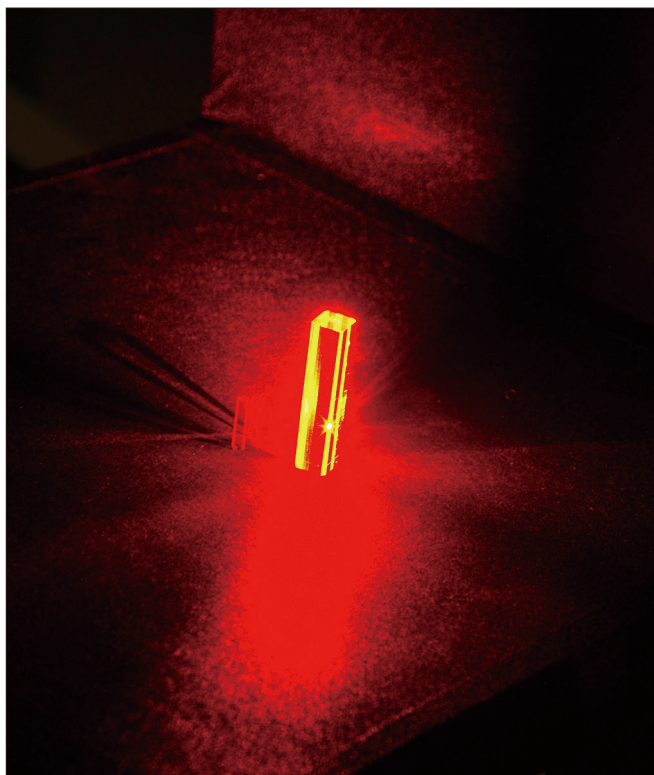


正电子发射型断层显像（PET）扫描仪很大程度上研发于 20 世纪 70 年代中期的 CERN。（照片由 CERN 提供）

不难断定，在 1928 年保尔·狄拉克试图统一狭义相对论与量子力学，写下近光速运动的电子所满足的方程时，没有人能预测到这项技术的发展。狄拉克方程具有两种解，它预测了一种新粒子的存在，该粒子除了电性与电子相反，其他一切性质都与电子相同。这正是卡尔·安德森 4 年后发现并命名的“正电子”。

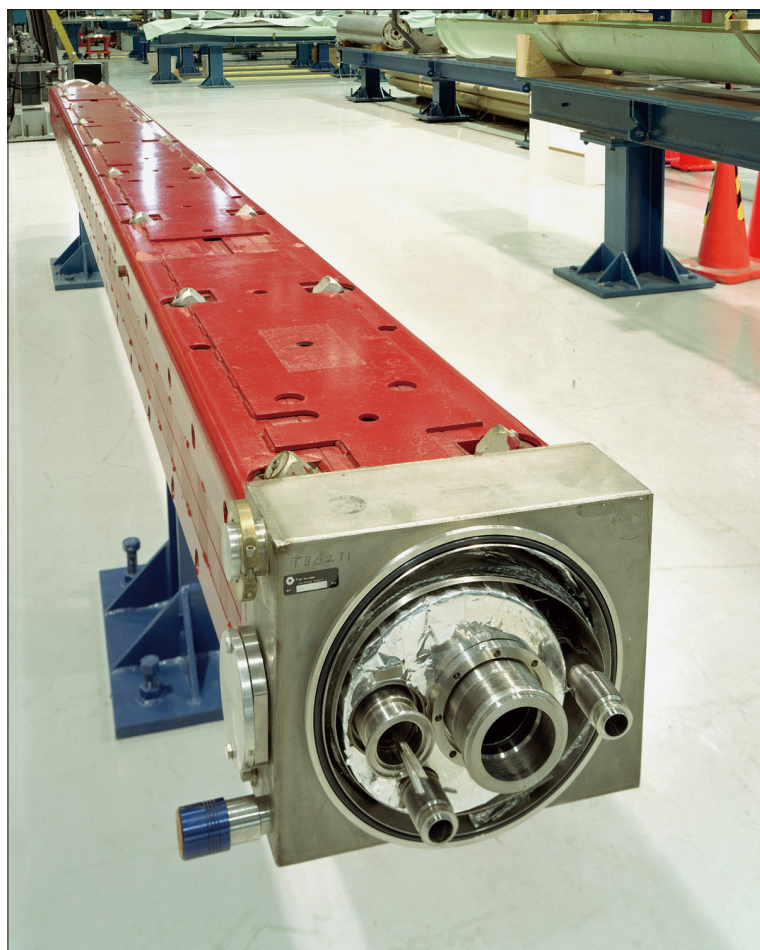
20 世纪 80 年代，CERN 物理学家开发了一种“成像晶体”，它在俘获特定粒子时能发出闪光。虽然人们最初打算将这种晶体用于粒子探测器，以揭示对撞的各种产物，但它后来已成为 PET 扫描仪的常规部件。10 年后，CERN 的科学家展示了如何在强磁场下应用这些成像设备，这一发现导致了一种新的医学工具，它将 PET 与核磁共振成像（MRI）

的若干特点相结合。“这个故事告诉我们……基础科学驱动创新，”CERN 总干事罗尔夫·霍伊尔如是说，与费米实验室洛基耶的观点不谋而合。^[7]



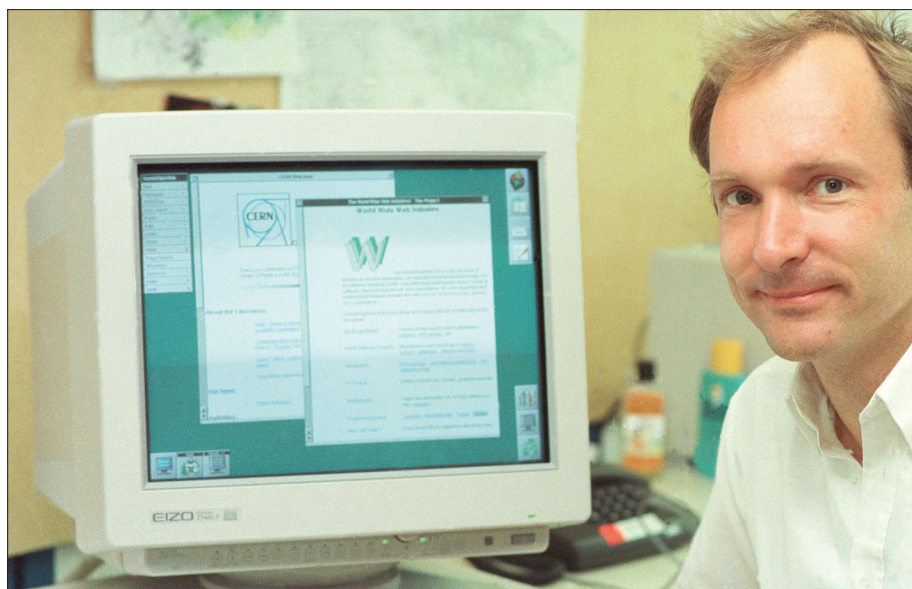
晶体闪烁体。当高能带电粒子或光子穿过其中，它就会发光。虽然 CERN 最初为粒子探测器研发了晶体闪烁体，但它们此后被用于 PET 扫描仪等医学影像设备中。（照片由 CERN 提供）

据费米实验室前副主任金英旗（Young-Kee Kim）所说，商用 MRI 设备是 Tevatron 对撞机大规模生产超导磁铁的产物。^[8] Tevatron 是应用铌钛超导磁铁的先驱，在此过程中产生了新的工业部门。这一类磁铁后来被用于 LHC，而这又很快导致了 MRI 机器的新进步。杜克大学的物理学家阿舒托什·考特瓦尔说：“整个医学成像领域的进步都来自那些只有粒子物理学家才会推动的东西。”^[9]



为 Tevatron 粒子对撞机研发的超导 (偶极) 磁铁 (照片由费米实验室提供)

不过迄今为止，在 LHC 上诞生的最重要的副产品则非万维网 (WWW) 莫属。该网络来自蒂姆·博纳斯-李在 1989 年的一项提议。作为当时 CERN 的软件工程师，博纳斯-李向其实验室建议，“将信息系统相互连接，以解决 CERN 的信息获取难题。”^[10] 他当时的上司，物理学家迈克·森道尔 (Mike Sendall) 认为该提议“含糊但令人兴奋”，并准许博纳斯-李继续钻研这个想法。^[11] 虽然博纳斯-李提出这个系统最初是为了给各国参与 LHC 的物理学家提供一个共享数据的方式，但其应用范围从此以后便大为扩展。由他引入的这种普遍方法自此以后发展成为覆盖整个世界的网络，并改变了全球的通信面貌。



蒂姆·博纳斯－李在 CERN 工作期间，为了创造能够管理并传播由大型强子对撞机产生的海量数据而发明了万维网。世界上第一个网站由博纳斯－李于 1991 年在 CERN 创建。（照片由 CERN 提供）

目前超过 30 亿人使用万维网，^[12] 并通过它发布了超过一万亿个网页。^[13] 加州理工大学物理学家肖恩·卡罗尔（Sean Carroll）发现，无处不在的网络令人非常依赖，以至于“很难想象没有网络的世界。没人会因为 CERN 某一天会发明 WWW 而资助它。这只不过是将聪明的头脑汇集一堂并给予其艰难的技术挑战，然后收获由此产出的成果罢了。”^[14]

网格计算是来自 LHC 的又一项创新，它基于万维网技术，并通过万维网传播开来。这项技术对于处理实验产生的海量数据非常必要，因为 LHC 每秒钟可产生十亿次粒子碰撞。^[15] 这迫使研究者必须在每年产生的 30 皮字节（大约 3 百亿兆字节）数据中进行筛查，以确定其中是否包含特别值得注意的物理过程。^[16] 在既没有计算容量也没有足够经费来就地处理数据的情况下，CERN 于 2002 年建立了全球 LHC 计算网格（WLCG）以共享数据分析责任。WLCG 是世界最大的计算网格，联接了 41 个国家 170 多个中心的计算机与存储系统，8000 多名物理学家因此可以几乎实时地使用 LHC 数据。^[17]

不过这个“网格”的影响已经远远超出 LHC。这种计算方式，据 CMS 前任发言人、物理学家约瑟夫·因坎德拉所说，“将在许多科学领域产生革命，”特别是那些需要处理海量数据的学科。^[18]

LHC 这类设备的一些效益则更具区域性，它使日内瓦及整个瑞士，还有法国从中获益——因为 LHC 也有一半坐落于法国。这样的项目创造了新的工作机会，使人们在宜居而无污染的环境下工作。科学家大量汇集在该区域并在此消费。CERN 前总干事卢察诺·迈安尼说，“因此这对当地社会与经济都是极大的促进。”^[19]迈安尼补充说，LHC 作为一个极其成功的典范，远不只是因为它业已取得了辉煌灿烂的科学成就。“对于政府而言这是一次收益巨大的投资，它在公众形象、技术，以及对青年人才的培训等方面都会获得丰硕回报。”^[20]

如果巨型对撞机得以实现，那么中国也将得到同样的回报。“主持一个大加速器项目会有很多收益，”伯克利的物理学家村山齐说，“通过引进新人才、新资源，创造更多新产业，整个国家将更为开放。”他补充道，人们已经在 CERN 及周边地区目睹了这些现象。这座世界上最大的物理研究中心极大地促进了当地社会。^[21]

多数人相信，建造下一代对撞机不仅会促进中国的高能物理研究，而且会提升中国科学的整体水平。此外，戴自海谈到，权衡各种投资的预期产出，高能物理实际上与所有其他科学领域相比都独具优势。“即使中国打算在高能物理以外的某些科学和工程项目投入比美国更多的资金，美国的教授们仍然会继续在美国做研究。但如果在这里建造一座巨型对撞机，那么就会激发（美国和别处的）几乎所有物理学教授考虑将他们的研究转移到中国。所以，这台对撞机的国际影响，远远大于把这笔资金投放到其他学科领域。”^[22]

LHC 就是一个很好的例子。在这里，任何时间都有多达 10000 名科学家与工程师在进行研究。戴自海认为，如果考虑到这台新设备将在

接下来 10 ~ 20 年内吸引如此多的科学家，则不难发现高能物理研究的预算其实并不比其他实验领域的投入更高，但是其回报却更大。^[23]

如果中国在该领域推动一个大规模项目，首先将会提升国家威望，使中国成为高能物理的领导者，甚至成为这一研究领域的世界中心。其最重要的结果就是进一步改善国际关系。“这种规模的科学合作在东西方史无前例，”尼玛·阿卡尼－哈梅德说。“任何促进合作增进友谊的东西都是有益的。你可以让 10000 人在一起工作和相互交流，这是搭建桥梁的重要方式。这个项目有如此多的方面都具有达到这些效果的潜力。”^[24]

如果中国敞开大门，成为在基础研究方面巨型国际合作的东道主，那么无论是粒子间的相互作用，还是人员间的相互交流，都会使整个国家更富裕。相比之下，中国历史上曾一度封闭孤立，其科学就因此落后于世界其他地区。王贻芳说：“开放政策至关重要，它使整个社会受益，并带动科学研究，给未来以更大希望。”^[25]

如前所述，一个大对撞机项目几乎必然促进技术的巨大进步。中国的高能物理项目迄今为止都只局限于中等规模，但这已经促进了中国第一个网站（在 高能所）的诞生、与外部世界的第一次因特网联接，以及网格计算的引入。^[26] BEPCII 的 BESIII 探测器是中国应用全新超导磁铁的先驱。高能所也研发了国内第一个微型 PET 与微型 CT（计算机断层显像）扫描仪。

当然，巨型对撞机的范围与规模都远超中国以往任何物理项目，它将会强化中国在高温超导体、抗辐射材料、高级测量仪器、高速计算、数据处理与存储、网络通信等方面的技术能力。“所有这些都与大规模加速器有关，”费米实验室物理学家、CEPC-SPPC 项目顾问周为仁说，“所有这些都是尖端技术。你将在多个前沿领域将这些技术发挥到极限。”^[27]

超导磁铁技术在该项目中尤其会得到巨大推动。“中国正寄希望于铌锡超导体，它将有可能产生一套全新的工业，甚至有可能在未来为磁悬浮列车提供支持，”考特瓦尔说。^[28]

现在还不可能确定究竟会有哪些意外收获，但是一定会有。在物理学史上最为宏伟而成功的物理理论——标准模型中，希格斯玻色子居于核心地位。但是没有人清楚这种粒子在将来有一天是否会有任何“实用”价值。“无论你相信与否，在最初发现电子时没有人知道它能有什么用，”丽莎·兰道说。量子力学后来被证明是半导体与电子工业的基石，在20世纪初这一理论逐渐成型时，其惊人的商业潜力并不明显。最前沿发现的效益既不直接，也不明显。兰道认为，我们看到的实际上是“社会以高等教育与经济繁荣伴随着前沿科学的发展，而后者又反过来以直接和间接的方式促进前者的进步。”^[29]

由此将能产生非常可观的社会效益，虽然这很难事先预测，而且也从来不是LHC这种项目及其后继者的主要驱动因素。“我们最强大的动机就是我们对基础科学的热爱，”约瑟夫·因坎德拉说，以及“对一种不朽的传统做出贡献”的机会。^[30]

然而，不应该认为高能物理不朽的名声理所当然。如果研究者没有新加速器来进行实验以检验理论，那么不难想象，整个领域就会萎缩并陷于停滞。几乎所有研究者都极度希望避免这一命运。“科学革命已经持续了好几个世纪，我们希望这个进程持续下去，”高等研究院院长罗伯特·戴格拉夫说，“我们想确保，21世纪不是我们停止探索的世纪。”^[31]

这把我们直接带到了问题的核心。粒子物理学家并不像这一职业的名字所显示的那样，只顾埋头寻找越来越多的粒子。在一定意义上，他们其实追随着一个宏大得多的传统，而这一传统深居于永恒的人性中。它就是对理解周遭世界之本质的深切渴望，同时不计任何物质回报与实际功用。“人类为什么研究科学？”对超对称等领域有关键贡

献的斯坦福大学物理学家萨瓦斯·狄莫普洛斯如是问。他说，没什么特别的理由。“对于我们的生存最不重要的事情恰恰是使我们成其为人的事情。”^[32]

对于这类时而深奥莫测的研究背后的驱动力，丁肇中的解释更直截了当：“好奇心驱使物理学家探索未知。”^[33]

丁肇中所提到的探索，处于科学事业的核心。物理学家自然总希望得到新结果。他们渴望发现新粒子，找出新的作用力与对称性，为他们的的问题找到答案。但是他们也很清楚，他们得到的多数答案只是暂时的答案。这些答案解决了某些疑惑，同时又凸显了我们在其他方面的无知，因而在新发现到来时总要经受修改。

戴格拉夫解释说，在科学中“你充其量只是长链中的一环。”^[34]指望下一个发现的新粒子就能扫清所有遗留问题，或者下一种理论的提出就是解释一切的终极理论，都是不切实际的。它们更可能会帮助我们提出之前从未想过的新问题。而且即使这个新理论很好，也不能指望它的原始形式永远成立，而不会再有补充、修改、扩展。在这条漫漫而修远的求索之路上，它们只能送我们一程，充当我们暂时歇脚的驿站，直到我们为迈出下一步准备好所需的资源。

关键在于，我们必须全力投身于对知识的追寻，使这一伟大传统保持活力并不断焕发新的生机。可以确定的是，这条道路有时荆棘丛生。来自理论、技术、财政、组织等方面的障碍有时使人望而却步，山重水复仿佛无路可寻。但是我们绝不愿停下来“算了吧，我们已经知道得够多了”。因为事实是，我们总想知道得更多。

如狄莫普洛斯所言，这种渴望或许就是我们之所以成为人类的关键所在。这也是古往今来驱使我们探索自然深层奥秘的主要因素。我们借此走到如今的地步，而 LHC 这座深埋于地下的丰碑就是我们好奇

心的见证。^[35]只要有强大的动力与决心，再加稍许运气，这种精神就会引领我们走向伟大探索的下一站。

参考文献

- [1] Leon Lederman and Dick Teresi. *The God Particle*. (Boston and New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2006), p. 124.
- [2] “This Month in Physics History — Discovery of Nuclear Fission.” *APS Physics* (online). 16 (December 2007). <http://www.aps.org/publications/apsnews/200712/physicshistory.cfm>.
- [3] David Gross. “After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?” Symposium, Tsinghua University, Beijing, February 23, 2014.
- [4] Steven Weinberg. *Dreams of a Final Theory*. (New York, Vintage Books, 1992), p. 282.
- [5] Kate Allen. “Basic science is the centre of gravity.” *Toronto Star* (online). November 25, 2014. http://www.thestar.com/news/world/2014/11/24/basic_science_is_the_centre_of_gravity_says_particle_physics_lab_chief.html.
- [6] Philip Burrows. “Particle Accelerators I.” The 2d Institute of Advanced Studies School on Particle Physics and Cosmology and Implications for Technology. Nanyang Technical University, February 2, 2015.
- [7] Rolf Heuer. “One Day, Sir, You May Tax It.” *CERN Bulletin* (online). February 14, 2011. <https://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2011/07/News%20Articles/1327614?ln=en>.
- [8] Dennis Overbye. “Collider Sets Record, and Europe Takes U.S.’s Lead.” *New York Times* (online). December 9, 2009. <http://www.nytimes.com/2009/12/10/science/10collide.html?pagewanted=all>.
- [9] Ashutosh Kotwal, Duke University/Fermilab (telephone interview with the author), April 13, 2015.

- [10] Tim Berners-Lee. "Information Management: A Proposal." March 1989.
<http://www.w3.org/History/1989/proposal.html>.
- [11] "Time Berners-Lee's proposal." *CERN* (online). <http://info.cern.ch/Proposal.html>.
- [12] Michael Moore. "More than Three Billion People Worldwide Now Have Broadband." *MSN TechWeekEurope*. January 26, 2015. <http://a.msn.com/01/en-gb/AA8BcD1?ocid=se>.
- [13] "History of the Web." *World Wide Web Foundation*. <http://webfoundation.org/about/vision/history-of-the-web/>.
- [14] Sean Carroll. *The Particle at the End of the Universe*. (New York: Dutton, 2012), p. 274.
- [15] "Large Hadron Collider restarts after two years." *University of Cambridge Research News* (online). April 7, 2015. <http://www.cam.ac.uk/research/news/large-hadron-collider-restarts-after-two-years>.
- [16] "Computing." *CERN Accelerating Science* (online). <http://home.web.cern.ch/about/computing>.
- [17] "The Worldwide LHC Computing Grid." *CERN Accelerating Science* (online). <http://home.web.cern.ch/about/computing/worldwide-lhc-computing-grid>.
- [18] Joseph Incandela. "After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?" (Symposium). Tsinghua University, Beijing, February 23, 2014.
- [19] Luciano Maiani, University of Rome (telephone interview with the author), April 22, 2015.
- [20] Luciano Maiani. "After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?" (Symposium). Tsinghua University, Beijing, February 23, 2014.
- [21] Hitoshi Murayama. "After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?" (Symposium). Tsinghua University, Beijing, February 23, 2014.

- [22] Henry Tye, Hong Kong University of Science and Technology (e-mail communication with the author), April 5, 2015.
- [23] Henry Tye, Hong Kong University of Science and Technology (e-mail communication with the author), June 2, 2015.
- [24] Nima Arkani-Hamed, IAS (interview with author in Cambridge, Mass.), April 1, 2015.
- [25] Yifang Wang, IHEP (interview with the author), August 4, 2014.
- [26] Xinchou Lou. "The CEPC-SppC Study Group in China: Introduction, Status and Future Plans." February 24, 2014.
- [27] Weiren Chou, Fermilab (interview with the author at IHEP), August 4, 2014.
- [28] Ashutosh Kotwal, Duke University/Fermilab (telephone interview with the author), April 13, 2015.
- [29] Lisa Randall. *Higgs Discovery*. (New York, Ecco, 2013), p. 39.
- [30] Joseph Incandela. "After the Higgs Discovery: Where is Fundamental Physics Going?" (Symposium). Tsinghua University, Beijing, February 23, 2014.
- [31] Robbert Dijkgraaf, IAS (telephone interview with the author). April 20, 2015.
- [32] Toni Feder. "Particle Fever: Filming the hunt for the Higgs boson." *Physics Today* (online). January 30, 2014. <http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/news/10.1063/PT.5.9007>.
- [33] Clara Moskowitz. "Antimatter Hunter." *Space.com*. May 15, 2011. <http://www.space.com/11671-shuttle-alpha-magnetic-spectrometer-ting.html>.
- [34] Robbert Dijkgraaf, IAS (telephone interview with the author). April 20, 2015.
- [35] Frank Wilczek. "'National greatness' versus real national greatness." *Science News*. October 11, 2008, p. 32.

长城之下有何物

山海关自古以来就有“天下第一关”之誉。其战略位置重要，北踞燕山南临渤海，“山海”之名实足当之。与其相距仅 15 千米的秦皇岛则是拥有 200 多万人口的度假胜地和繁忙港口。不过以中国的标准衡量，秦皇岛只能算中等规模的城市。

山海关历来是中国严加防守的关隘，是整个国家抵御外来侵略者的要塞。来自北面山地的侵略者取道于此，东则直抵首都北京，西则通向古都长安（西安）。

如今，长城面临的最大威胁已不再是企图闯关而过的外敌，反倒是每年成千上万的观光客。一些过度狂热的游客不顾当地禁令取走城墙的砖石作为纪念。然而，即使在法规允许的范围内，损害也在所难免。仅仅是大量徒步行走的游客，也会在不经意间对这些古建筑造成侵蚀。

如果天气良好，山海关一带的长城每天都要接待数以千计的游客。在横贯中国北方的整个长城当中，这一段长城保留得相对完好。山海关的城址始建于 14 世纪早期的明朝，也是这片地区最受青睐的旅游胜地之一。附近还有不少引人入胜的景点，如长城脚下的孟姜女庙、燕山脚下的燕塞湖、长寿山，以及长城向东入海的老龙头。

参观这片名胜古迹的观光客大概不会察觉到，从现在起大约十年之后，一座巨型对撞机很可能在此将粒子加速到“相对论性”的速度。

这些被加速的粒子不仅有正负电子，最终还要包括质子和重离子。这一切就将发生在游客们的脚下。其上覆盖的 100 米厚的岩层，足以为这些高压过程提供充裕的屏蔽。

与长城不同，新加速器不会径直接触太平洋。它与这片世界上最大的海洋相隔至少几千米。不过它将触及一些同样深广的领域，那就是自然定律的无尽宝藏。

作为闻名世界的旅游胜地，长城如今不再扮演任何防御性的角色。而如前所述，巨型对撞机的目标恰好相反。这台对撞机的初衷绝不是将人们阻挡在中国之外，而是将他们——特别是物理学家和工程师——吸引到中国，共同参与正在蓬勃发展的合作研究，从多个方面和多种视角拓展我们的知识疆界与科学前沿。

这项计划中的加速器自然是相对昂贵的项目，建造它的理由与军事或国家安全也无关系。除了因促进了国际合作而带来的安全性，它对中国的国防也无任何贡献。但正如物理学家罗伯特·威尔逊曾就 Tevatron 对撞机所做之断言，它将会使中国成为一个更值得保卫的国家，而整个社会也将从中受益。

如果这台巨型高能物理设备有朝一日得以实现，其目的并不在于一国的荣耀，而是为了全世界科学的进步。很多有识之士期待该项目能够顺利进行。如果是这样，那么这次雄心勃勃的科学探险就将承担起最切近人类本性的事业：寻求知识本身，仅仅因为我们好奇。我们的追求必将实现，因为我们有智慧、有能力在那些最为深远而永恒的问题上取得进展。只有人类，才敢于如此发问。



中国万里长城在秦皇岛附近的老龙头伸入太平洋。(China Highlights 旅行社供图)

附录

LHC 安全吗？^[1]

米开朗基罗·曼加诺 (*Michelangelo Mangano*)

约翰·艾利斯 (*John Ellis*)

吉安·朱迪切 (*Gian Giudice*)

伊戈尔·特卡切夫 (*Igor Tkachev*)

乌尔斯·威德曼 (*Urs Wiedemann*)

大型强子对撞机 (LHC) 可产生的能量高于以往所有粒子加速器，然而，自然界中宇宙射线频繁碰撞的能量更高。多年来，业界一直在解答关于这些高能粒子碰撞产物的安全性问题^[2,3]。鉴于新近实验数据与理论推测，LHC 安全性评估小组 (LSAG) 在 2003 年由独立科学家组成的 LHC 安全性研究团队的分析基础上，更新了其研究报告。

LSAG 重新肯定并扩展了 2003 年报告的结论，即：LHC 对撞没有危险，并且没有理由为此担心。LHC 所做的任何事，自然界从地球等天体诞生以来已经做过许多次。经过评议，LSAG 报告业已得到 CERN 科学政策委员会批准。CERN 科学政策委员会由外部科学家组成，并为 CERN 的监督组织 (理事会) 提供建议。

以下总结了 LSAG 报告^[2]的主要论点。对其细节感兴趣的读者可直接查阅该报告及其中提到的技术性科学论文^[3]。

宇宙射线

LHC 与其他粒子加速器一样，在受控的实验室条件下重现宇宙射线这种自然现象，以对其进行更详细的研究。宇宙射线是在外太空产生的粒子，其中一些粒子会被加速到远超 LHC 的能量。其能量及其到达地球的速率在过去 70 年的实验中已被反复测量。数十亿年来，自然界在地球上产生的对撞数量已高达 LHC 实验的百万倍，而地球却依然存在。天文学家在宇宙中观测到了大量更为庞大的天体，它们也都经受了宇宙射线的撞击。整个宇宙每秒钟会进行十万亿次如同 LHC 的实验。任何危险后果的可能性都与天文学家的观测相悖：因为恒星与星系依然存在。

微型黑洞

自然界中，一些远大于太阳的恒星在生命结束时会坍缩成为黑洞。它们在很小的空间中聚集了大量的物质。而关于 LHC 上微型黑洞的猜测，则是指一对质子碰撞的产物，每个质子的能量仅与一只飞行的蚊子相当。天文学黑洞比 LHC 可能产生的任何黑洞都要重得多。

根据爱因斯坦的相对论所描述的、已被充分确认的引力性质，LHC 上不可能产生微型黑洞。然而尚有一些猜测性理论认为，在 LHC 上会产生此类黑洞。所有这些理论都预测，这些黑洞会在瞬间碎裂。因此，这样的黑洞没有时间来吸收物质，从而无法产生宏观效果。

不仅理论预期微观黑洞不稳定，而且通过对宇宙射线可能产生的微观黑洞进行研究，也表明它们是无害的。与宇宙射线撞击地球之类的天体不同，LHC 中对撞产物的速度一般会低于宇宙射线产生的新粒子。稳定的黑洞既可以带电，也可以呈电中性。如果它们带电，则不论其来自 LHC 还是宇宙射线，都会在穿越地球的过程中与普通物质相互作用。地球依然存在这一事实本身就排除了宇宙射线或 LHC 可能产生危险带电微型黑洞的可能性。另一方面，如果稳定的微型黑洞不带电，

则它与地球的相互作用就很弱。宇宙射线产生的此类黑洞会无害地穿过地球进入太空, 而 LHC 产生的此类黑洞则有可能停留在地球上。不过, 宇宙中存在比地球更大更致密的天体。当宇宙射线撞击中子星和白矮星这样的天体时, 产生的此类黑洞就会被拦截。而这些致密天体以及地球的稳定存在, 就排除了 LHC 产生任何危险黑洞的可能性。

奇异夸克团

奇异夸克团是指一种由几乎等量的上夸克、下夸克、奇夸克构成的假想微观团块的“奇异物质”。多数理论认为, 奇异夸克团会在十亿分之一秒内转化成普通物质。然而, 奇异物质会与普通物质结合, 并将后者转化为奇异物质吗? 这一问题在 2000 年美国相对论重离子对撞机 RHIC 启动前就被提出。当时的一项研究表明, 没有理由为此担心, 而 RHIC 已运行了 8 年¹, 对奇异物质的搜寻却一无所获。LHC 将会在一定时段内进行重原子核碰撞, 就像 RHIC 一样。LHC 的粒子束能量比 RHIC 更高, 但这使得奇异物质更不可能形成。奇异物质在此类对撞所产生的高温下很难持续存在, 就像热水中无法形成冰。此外, LHC 中的夸克比 RHIC 更稀疏, 从而更难形成奇异物质。所以, 奇异夸克团在 LHC 上比 RHIC 更难产生, 因此经验已经提供了奇异夸克团无法产生的论据。

真空泡

有人猜测, 宇宙并非处于其最稳定的形态, 而 LHC 造成的扰动有可能将其推入更稳定的状态, 称为真空泡, 我们无法在其中存在。如果 LHC 能做到这一点, 那么宇宙射线碰撞也可以。既然在可见宇宙中的任何地方都没有生成这种真空泡, 那么 LHC 上也无法制造它。

¹ 这是指到此文公布的 2008 年为止的运行时间。时至 2015 年底, RHIC 已经安全运行了 15 年。——译者注

磁单极子

磁单极子是一种具有单独磁极（北极或南极）的假想粒子。一些理论猜测认为，如果它们存在，就会导致质子衰变。这些理论同时表明，磁单极子太重，无法在 LHC 上产生。然而，如果磁单极子轻到足以在 LHC 上产生，那么撞击地球大气层的宇宙射线应该已经制造了它们，从而地球会高效地将其拦截并俘获。因此，地球和其他天体持续的存在就排除了 LHC 上产生吞噬质子的危险轻磁单极子的可能性。

参考文献

- [1] M. M. Mangano, J. Ellis, G. Giudice, I. Tkachev, U. Wiedemann, “The Safety of the LHC”, CERN Press Office, <http://press.web.cern.ch/backgrounders/safety-lhc>.
- [2] LHC Safety Assessment Group, “Review of the Safety of LHC Collisions”, <http://lsag.web.cern.ch/lsag/LSAG-Report.pdf>.
- [3] S. B. Giddings and M. M. Mangano, “Astrophysical implications of hypothetical stable TeV-scale black holes”, Phys. Rev. D78 (2008) 035009 [arXiv: 0806.3381].

索引

符号

“大型地下氙”（LUX）实验 117
“粒子与天体物理氙”实验 117
“助推”加速器 159
《科学》杂志 117, 130
 α 粒子 17, 18, 19, 20, 34
 β 粒子 19
 θ 粒子 28
 μ 中微子 39, 49, 123, 124
 μ 子 25, 28, 29, 39, 48, 49, 50, 61, 62, 69, 70, 72, 122, 140, 141
 π 介子 28, 30, 31, 48, 128
 τ 中微子 47, 49, 50, 65, 123, 124
 τ 子 39, 48, 49, 61, 122, 140
 τ - θ 疑难 28
 Ω^- 粒子 31, 34

数字

753 计划 134, 136

英文

A

ALICE 69
ATLAS 69, 70, 73, 75, 87, 98, 100, 174

B

BICEP2 115, 116
BICEP3 115, 116

C

CERN 11, 31, 35, 36, 45, 46, 58, 66, 67, 70, 71, 73, 74, 75, 76, 84, 86, 87, 88, 90, 101, 107, 128, 133, 134, 138, 145, 156, 158, 161, 162, 170, 171, 172, 174, 187, 188, 189, 190
CMS 69, 70, 71, 73, 74, 77, 87, 170, 191

D

DESY 40, 144

E

$E=mc^2$ 23, 62, 185

J

JUNO 122, 129, 130, 177

K

KEK 143, 166

L

LHCb 69

P

PETRA 40, 41

T

TASSO 40
 Tevatron 11, 46, 64, 65, 67, 68, 128, 164,
 172, 188, 189

中文**A**

阿波罗项目 176
 阿卜杜勒·萨拉姆 44
 阿尔伯特·爱因斯坦 17, 134, 185
 阿尔伯特·迈克尔孙 84
 阿尔法磁谱仪 119
 阿兰·布隆德尔 157
 阿里 116, 144
 阿蒙森－斯科特南极站 115
 阿舒托什·考特瓦尔 164, 188
 埃米利奥·塞格雷 26
 艾萨克·牛顿 8
 爱德华·索恩代克 142
 爱德华·威滕 10, 11, 20, 76, 92, 100
 安德烈·萨哈罗夫 165
 暗能量 85
 暗物质 85, 95, 96, 97, 98, 99, 101, 106,
 117, 118, 119, 121, 163, 164, 165,
 168
 奥斯卡·克莱因 104
 奥托·弗里施 186

B

B 重子 65
 BaBar 实验 143
 保尔·狄拉克 24, 132, 187
 Bc 介子 65
 北京正负电子对撞机 7, 137, 161, 178
 彼得·麦金泰尔 45
 彼得·希格斯 55, 56, 58

必赢定理 162
 标电子 93, 94
 标顶夸克 99, 164
 标夸克 93, 94, 98, 99, 164
 标轻子 93
 标中微子 93
 标准模型 44, 47, 48, 49, 50, 55, 59, 60, 61,
 75, 77, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91,
 92, 93, 94, 95, 96, 98, 100, 101, 107,
 115, 117, 122, 123, 124, 129, 140,
 143, 155, 163, 164, 165, 167, 168
 玻色子 43, 44, 45, 48, 49, 50, 55, 58, 59,
 63, 64, 65, 71, 74, 75, 76, 77, 83, 86,
 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
 97, 99, 101, 105, 106, 145, 155, 156,
 161, 162, 163, 165, 167
 伯顿·里克特 37, 171
 不确定性原理 21
 布朗运动 17
 布里安·福斯特 89
 布里安·格林恩 60, 62, 89
 布鲁克海文国家实验室 31, 126, 134

C

粲夸克 36, 37, 38, 39, 49, 65, 139, 140, 143
 粲物理 139, 143
 CERN 情报 142
 超伴子 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101,
 102, 164, 165
 超导磁铁 46, 68, 120, 141, 146, 161, 173,
 174, 176, 177, 188, 192, 193
 超级质子对撞机 88, 146, 157, 175
 超级质子同步加速器 46, 128
 超子 30, 132
 沈肖雁 143, 144
 陈和生 134, 138, 139, 140, 141, 143
 重整化 45
 磁场 20, 22, 24, 28, 46, 50
 磁矩 24
 CP 破缺 126, 127, 128, 166

村山齐 10, 11, 191

D

大爆炸 21, 45, 59, 68, 78, 85, 96, 115, 123

大型电子-正电子对撞机 46, 66

大型强子对撞机 7, 58, 66, 69, 70, 71,
155, 190

大型正负电子对撞机 145, 157

大亚湾 7, 122, 123, 124, 125, 126, 127,
128, 129, 130, 131, 177

戴维·格罗斯 2, 3, 10, 35, 169, 177, 186

戴维·克莱恩 45

戴维·米勒 57

戴维·卡普兰 8

戴自海 3, 40, 173, 191

丹·胡珀 50, 97

氮原子核 18

德漠克利特 15

等级问题 91, 92, 95, 96, 102, 103, 104,
105

邓小平 137, 138

第2轮运行 88, 99, 101, 169

电场 20, 22

电磁力 41, 44, 45, 49, 59, 60, 77, 96

电荷与质量之比 16

电气时代 185

丁肇中 8, 35, 36, 37, 38, 41, 119, 120, 121,
122, 131, 132, 134, 139, 140, 171,
194

氦-222 17

DORIS 电子-正电子加速器 39

对称性破缺 29, 39, 41, 61, 94, 95, 126,
128, 163

对撞机

巨型对撞机 15

E

额外维 103, 104, 105, 106

恩格勒-布劳特-希格斯-顾劳尼克
-哈根-基波机制 61

恩里科·费米 39, 48

F

法比奥拉·查诺蒂 75, 161

反夸克 31, 37, 39, 40, 48, 50, 63, 71, 72,
90, 98, 99, 126, 140, 144, 166

反物质 24, 25, 45, 86, 126, 128, 132, 163,
165, 166, 167, 168

反质子 24, 25, 26, 46, 63

反中子 24, 26, 166

反 Σ 负超子 132

方守贤 134

方毅 136, 137

非常大型强子对撞机 170

菲利普·安德森 56

费米国家加速器实验室 39, 64

费米实验室 11, 39, 41, 46, 49, 50, 62, 64,
65, 68, 76, 92, 97, 102, 128, 134,
136, 145, 157, 164, 170, 186, 188,
189

费米子 48, 49, 77, 93, 94, 95

芬尼根守灵夜 31

弗莱德·哈里斯 139, 144

弗兰克·克劳斯 23

弗兰克·韦尔切克 2

弗朗索瓦·恩格勒 58

弗雷德里克·莱尼斯 49

复合希格斯 103, 105, 106

G

高杰 161

高能物理 22, 46, 50

高能物理研究所 7, 87, 116, 135

戈登·凯恩 47, 92, 95

格雷姆·罗斯 40

共振态

奇共振态 30

$Y1^*(1385)$ 30, 31

钴-60 28

光电倍增管 125
 光微子 93, 97
 光子 41, 44, 45, 49, 56, 57, 59, 60, 61, 71,
 72, 73, 75, 84, 93, 96, 99, 121, 123,
 132, 188
 规范不变性 41, 42
 郭兆林 115, 116
 国际高能物理大会 73
 国际空间站 119, 121
 国际未来加速器委员会 157
 国际直线对撞机 89, 161

H

氦原子 17
 河外宇宙偏振背景成像 3 115
 核磁共振成像 187
 核聚变 8, 43, 186
 核子 19, 31, 35, 43
 荷力粒子 35, 43, 44, 50, 59, 60, 61, 77, 93,
 167
 亨利·肯德尔 34, 50
 胡安·马尔德西纳 63
 华国锋 136
 环形正负电子对撞机 88, 146, 157
 黄河工程咨询公司 174
 回旋加速器 20, 21, 23
 霍华德·乔吉 92

J

J. J. 汤姆森 16, 55
 基本粒子 3, 8, 16, 18, 19, 21, 37, 47, 49,
 55, 59, 60, 62, 63, 64, 76, 77, 86, 91,
 93, 95, 97, 101, 105, 133, 162, 163
 季向东 117, 118
 渐进自由 35
 姜·巴特沃思 125, 174
 交变梯度同步加速器 31
 交叉储存环 156
 杰弗里·戈德斯通 56

杰拉德·埃图夫特 10, 45, 47, 55, 63, 107,
 132, 172
 杰拉德·顾劳尼克 58
 杰罗姆·弗里德曼 29, 34, 50
 金英旗 188
 紧凑 μ 子线圈 69
 锦屏地下实验室 117
 静质量 25, 30, 43, 62
 居里夫人 28
 巨型对撞机 2, 3, 10, 15, 47, 115, 131, 145,
 175, 178, 191, 192, 199, 160

K

卡洛·鲁比亚 45
 卡文迪许实验室 16, 18, 19
 开尔文 46, 84
 康普顿效应 132
 柯勒·布斯·露丝 28
 科学技术合作协议 137
 克莱德·科万 48
 克莱姆·普莱克 (Clem Pryke) 117
 肯尼迪航天中心 121
 夸克模型 31, 35, 38, 43, 50

L

莱安·米切尔 144
 劳伦斯伯克利国家实验室 126, 127,
 174
 里昂·莱德曼 28, 65
 李政道 8, 27, 28, 29, 131, 132, 133, 134,
 136, 137, 138
 理查德·加尔文 28
 理查德·泰勒 34, 50
 锂原子核 19
 丽莎·兰道 61, 69, 91, 193
 粒子物理 8, 9, 12, 21, 22, 30, 31, 32, 44,
 47, 50, 65, 71, 75, 77, 84, 85, 87, 91,
 106, 117, 118, 130, 131, 133, 143,
 145, 146, 170, 172, 173, 186, 188,
 193

莉泽·梅特纳 186
 量子场论 47, 90
 量子电动力学 41
 量子色动力学 41, 50, 143
 留基波 15
 娄辛丑 159, 160, 169, 176
 卢布·哥德堡 68
 卢查诺·迈安尼 36, 88
 卢察诺·迈安尼 10, 11, 171, 177, 191
 陆锦标 126, 127, 128, 130
 罗伯特·布朗 17
 罗伯特·布劳特 58
 罗伯特·戴格拉夫 78, 145, 176, 193
 罗伯特·威尔逊 64, 65, 136, 200
 罗尔夫·霍伊尔 162
 罗尔夫·威德罗 20
 罗夫·霍伊尔 73, 74
 罗纳德·波灵 143
 罗切斯特高能物理会议 30

M

M 理论 11, 103
 M 项目 32
 马丁·珀尔 39, 140
 马丁努斯·韦尔特曼 45, 107
 马塞尔·温利希 28
 马特·斯特拉斯勒 57, 72, 87, 97, 124
 马修·施瓦茨 107
 玛丽·盖拉德 40
 迈克·森道尔 189
 迈克尔·法拉第 119, 185
 迈克尔·佩斯金 97, 163
 毛泽东 133, 136
 梅丽莎·富兰克林 100
 美国国家标准局 28, 29
 美国物理学会 130
 穆雷·盖尔曼 30

N

纳坦·塞伯格 108
 奈哲尔·洛基耶 62, 186
 南部阳一郎 56, 58
 尼玛·阿卡尼－哈梅德 63, 83, 84, 158, 192
 尼维斯回旋加速器 28
 诺贝尔物理学奖 20, 25, 34

O

欧内斯特·劳伦斯 19, 26
 欧内斯特·卢瑟福 17
 欧内斯特·沃尔顿 19
 欧文·张伯伦 26

P

潘诺夫斯基实验粒子物理奖 130
 葡萄干布丁模型 17, 55
 普朗克空间望远镜 116
 普朗克能标 86, 90, 91, 92, 103, 104
 普林斯顿高等研究院 8, 27, 63, 78, 83, 123

Q

奇夸克 36, 49, 132
 卡尔·哈根 58
 卡鲁查－克莱因（或者 KK）粒子 104
 强作用力 35, 41, 42, 44, 48, 63, 99
 乔·利肯 76
 乔治·茨外格 31
 乔治·斯德曼 40
 秦皇岛 3, 174, 175, 199
 氢原子核 18, 34
 轻子 39, 47, 48, 49, 50, 60, 61, 71, 72, 73, 75, 85, 93, 95, 100, 122, 140, 141, 142, 167
 囚禁 35, 43
 钷 125
 全球定位系统 186

R

R 值 140, 141

让·佩兰 17

弱作用重粒子 118

S

萨瓦斯·狄莫普洛斯 92

塞吉奥·贝托鲁齐 86

三倍大型正负电子对撞机 159

色荷 41, 43, 99, 100

森井政宏 98

闪烁体 125, 129, 188

上帝粒子 63

舍伍德·波勒特 66

十一月革命 38, 139

寿命 23, 28, 44, 46, 71, 126

衰变 23, 28, 29, 30, 36, 43, 44, 48, 50

斯蒂芬·温伯格 22, 40, 42, 44, 60, 86,
123, 186

斯蒂夫·米尔斯 174

斯坦福正负电子加速环 140

斯坦福直线加速器中心 32, 130, 131

四轻子事件 73, 75

苏萌 116, 117

T

太电子伏 46

太阳中微子之谜 123

探测器 12, 22, 23, 40, 69, 70, 71, 75, 76,
98, 115, 117, 118, 120, 122, 125,
126, 128, 129, 139, 141, 142, 155,
160, 161, 165, 168, 169, 187, 188,
192

汤川秀树 60

唐·林肯 92

提奥多·卡鲁查 104

体粒 16

同步回旋加速器 29

同步加速器 22

托马斯·迪格兰德 40

托马斯·基波 58

W

W-W 散射 61, 162

W 微子 165

瓦尔·费奇 126

瓦尔特·阿尔瓦雷茨 30

瓦伦丁·泰勒迪 29

万维网 189, 190

王淦昌 132, 133

王贻芳 7, 8, 9, 10, 87, 89, 106, 126, 127,
129, 130, 134, 139, 157, 159, 171,
172, 173, 174, 175, 177, 178, 192

未来高能物理中心 9, 12, 158

未来环形对撞机 158, 170

沃尔夫冈·潘诺夫斯基 130, 131

沃尔夫冈·泡利 43, 59

沃尔夫冈·施内尔 174

吴健雄 28, 29

吴汝哲 40

X

西蒙·范德米尔 46

希格斯场 55, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64,
69, 87, 88, 90, 91, 95, 96, 99, 100,
163, 167, 168

希格斯工厂 89, 97, 156, 157

希格斯机制 44, 45, 57, 75, 123

希格斯力 77

希格斯粒子 55, 63, 64, 65, 71, 72, 73, 75,
76, 77, 83, 87, 93, 95, 102, 103, 105,
106, 156, 162, 163, 167, 168

希格斯微子 93, 97, 165

希格斯质量 87, 89, 90, 92, 95, 96, 101,
102, 105, 106, 108, 141, 156, 163

狭义相对论 24, 47, 57, 84, 185, 187

氦原子核 118

弦论 11, 100, 101, 103

胶微子 93, 98, 99, 164

胶子 31, 35, 40, 41, 43, 44, 50, 60, 61, 62,
63, 68, 71, 89, 93, 98, 99, 143, 156,
160, 164

小林诚 39

肖恩·卡罗尔 190

叶铭汉 134

谢尔顿·格拉肖 36, 44

虚粒子 63, 89, 90, 91, 106

旋转对称性 61, 95

Y

亚瑟·康普顿 132

亚原子粒子 16, 21, 28, 47

广义相对论 42, 47, 85, 90, 101, 134, 186

杨-米尔斯理论 41, 42, 43, 44, 59

杨振宁 8, 27, 28, 29, 41, 42, 43, 59, 131,
132, 133, 134

伊萨克·牛顿 119

伊西多·拉比 25, 30

益川敏英 39

阴极射线管 16

湮灭 40, 46, 121, 128, 132, 140, 165

英国皇家学会 19

尤瓦尔·涅曼 30

宇称破坏 8, 27, 28, 29, 30

宇称守恒 28

宇宙微波背景 115

原子核 17, 18, 19, 28, 32, 35, 41, 43, 50

原子论 15, 16

约翰·艾利斯 40, 84

约翰·巴考尔 123

约翰·道尔顿 15

约翰·考克罗夫特 19

约翰·科瓦克 116

约翰·帕斯托 64

约翰·卡尔斯特罗姆 117

约瑟夫·因坎德拉 10, 73, 74, 86, 191,
193

Z

詹姆斯·查德威克 19

詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 44, 119, 185

詹姆斯·克罗宁 126

詹姆斯·乔伊斯 31

张闾 138, 145

张文裕 133, 134, 136

赵忠尧 132

正电子 25, 36, 37, 39, 40, 46, 66, 72, 89,
121, 125, 128, 132, 134, 138, 139,
141, 187

郑志鹏 134

质子的旋转木马 20

中间矢量玻色子 45

中微子混合角 129, 130

中微子振荡 123, 124, 125

中微子振荡反应堆实验 126

中微子质量 86, 123, 128, 129

中性微子 93, 96, 98, 99

终极强子对撞机 155

重子 30, 31, 38, 41, 48, 132, 166, 167

重子数 166, 167

周恩来 133, 134, 136

周培源 133, 134

朱光亚 133

朱明中 123, 129, 131

自然性 108

自旋 28, 62, 76, 77, 87, 93, 125, 132

最轻的超对称粒子 97, 99, 164

